

Einfluss von Überdeckungsgrad, Einstrahlwinkel und Strahlmittel auf die Schwingfestigkeit von Ti-6Al-4V beim Verfestigungsstrahlen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (univ.) Jochen P. Fuhr

aus Berlin

genehmigt von der
Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
07. August 2017

Dekan

Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Spitzer

Vorsitzende der Promotionskommission

Prof. Dr.-Ing. Babette Tonn

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Wagner

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Zeitraum März 2014 bis April 2017 am Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik der Technischen Universität Clausthal angefertigt.

Mein Dank gilt insbesondere

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Wagner für die Möglichkeit, diese Arbeit in seinem Fachgebiet durchführen zu können, sowie sein Interesse, Diskussionsbereitschaft und seinem Einsatz dafür, die Inhalte und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit auf diversen internationalen Konferenzen präsentieren zu können,

Herrn Oberingenieur Dr. Manfred Wollmann für die engagierte Betreuung der Arbeit und sein stets großes Interesse. Durch seine zahlreichen Hinweise und richtungsweisenden Diskussionen hat er wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen,

Herrn Dr. Mansour Mhaede und Herrn Mahmoud Basha für die versuchs- und auswertungstechnische Betreuung der Arbeit am Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik, als auch die hierzu geführten zahlreichen Besprechungen, ohne deren Beider Unterstützung vor Ort die Erstellung der Arbeit gänzlich unmöglich gewesen wäre,

Herrn Christian Becker der mit seinem innovativen und tadellos funktionierenden Probenmanipulator sowie zahlreichen Messungen an den verschiedenen Proben zu den wesentlichen Inhalten der Arbeit maßgeblich beigetragen hat,

Herrn Helmut Watko der mich als mein Vorgesetzter bei meinem Arbeitgeber, der Firma Curtiss-Wright/Metal Improvement Company, von Anfang an bei der Idee zu dieser Arbeit unterstützt und für den nötigen Rückhalt gesorgt hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Jasmin, die mich in so manch schwieriger Phase jederzeit moralisch gestützt und zeitlich den notwendigen Freiraum gewährt hat und meinen Eltern ohne deren nicht zuletzt ausbildungstechnische Grundsteinlegung diese Arbeit hätte nie durchgeführt werden können.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde systematisch die Auswirkung der Variation von Überdeckungsgrad, Einstrahlwinkel und Strahlmittel auf das Ermüdungsverhalten von zwei Arten von Ermüdungsproben aus der Legierung Ti-6Al-4V untersucht.

Hierbei wurden drei in der Industrie für das Verfestigungsstrahlen von diesem Werkstoff häufig verwendete Strahlmittelsorten (ASR110, ASH110, SCCW14) verwendet.

Bei der Variation sowohl des Überdeckungsgrades (20/100/1200 %) als auch des Einstrahlwinkels (30/45/60/90°) wurde darauf geachtet innerhalb der für das Kugelstrahlen von Luftfahrtbauteilen zulässigen Grenzwerte für das Verfestigungsstrahlen zu bleiben.

Während die Untersuchungen bezüglich des Deckungsgradeinflusses an Umlaufbiegeproben durchgeführt wurden, kamen bei den Versuchen in Hinsicht auf den Einfluss des Einstrahlwinkels Wechselbiegeproben zum Einsatz. An beiden Typen von Ermüdungsproben wurden die Auswirkungen des Verfestigungsstrahlens auf die Rauigkeit bzw. Oberflächentopographie, den randschichtnahen Bereich, die Eigenspannungen und die Schwingfestigkeit hin untersucht.

Neben den zuvor angeführten Strahlvariablen (Strahlmittel, Deckungsgrad, Einstrahlwinkel) wurde die Strahlintensität – soweit möglich - in allen untersuchten Fällen konstant bei 0,20 mmA gehalten. Diese Vorgabe hatte zur Folge, dass insbesondere bei den Versuchen mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel die Strahlmittelgeschwindigkeit mittels Luftdruck angepasst wurde, um das annähernd gleiche Niveau der Strahlintensität zu gewährleisten.

Alle Untersuchungen mit unterschiedlichen Strahlmitteln, Einstrahlwinkeln und Überdeckungsgraden an Umlauf- und Wechselbiegeproben haben den lebensdauererhöhenden Effekt einer kontrollierten Kugelstrahlbehandlung bei Überdeckungen ≥ 100 % nachgewiesen.

Bei den Versuchen an den Umlaufbiegeproben stellte sich heraus, dass Überdeckungsgrade mit 20 % in nahezu allen Fällen zu einem Abfall der Schwingfestigkeit gegenüber dem unbehandelten Ausgangszustand führten.

Die höchsten Steigerungen der Schwingfestigkeiten an den Umlaufbiegeproben zeigten tendenziell die mit hoher Überdeckung (1200 %) und hartem Strahlmittel (SSCW14, ASH110) behandelten Proben.

An den Wechselbiegeproben offenbarten die mit flachem Einstrahlwinkel (30°, 45°) und hohen Überdeckungsgraden behandelten Proben deutlich höhere Schwingfestigkeiten als die unter 90° bei gleicher Intensität kugelgestrahlten Vergleichsmuster.

Dieses Ergebnis ist umso bemerkenswerter, als die mit flachem Einstrahlwinkel gestrahlten Proben die höchsten Rauigkeiten und darüber hinaus bereits deutlich sicht- und messbare Welligkeiten an der gestrahlten Oberfläche zeigten.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass bei den hier überprüften Strahlparametern der Einfluss der eingebrachten Druckeigenspannungen und die Erhöhung der Versetzungsdichte wesentlichen Einfluss auf die Erhöhung der Schwingfestigkeit von Ti-6Al-4V nehmen.

Die Versuche mit flachem Einstrahlwinkel bei konstanter Strahlintensität resultieren in zusätzlichen gerichteten oberflächennahe Deformationen, die in Ihrer Ausprägung eventuell eine weitere – aber noch näher zu untersuchenden - Erhöhung des Widerstandes gegenüber der Rissausbreitung und damit auch der Schwingfestigkeit darstellen.

Nahezu keinen Einfluss auf die Lebensdauer nahm bei allen Versuchen die deutlich veränderte Oberflächentopographie bzw. Rauigkeit nach dem Verfestigungsstrahlen gegenüber dem Eingangszustand.

Abstract

Within this work the effect of variation in shot peening coverage, impingement angle and shot materials on the high cycle fatigue performance of two different fatigue probes - both made of the same alloy Ti-6Al-4V - was methodical investigated.

Three typically used shot types (ASR110, ASH110, SCCW14) for treating this kind of alloy by shot peening in the industry have been used.

Within the variation of peening coverage (20/100/1200 %) and impingement angle (90/60/45/30°) the limitations for those have been kept to the approved limitations of the aerospace industry.

For the investigation of the peening coverage rotating-bending and for the impingement-angle alternating bending fatigue samples have been used. On both types of probes the effect of shot peening in terms of surface roughness and topography, the close surface area, the residual stress and the cyclic fatigue performance was investigated.

Beside the before mentioned shot peening parameters the targeted peening intensity for all investigated configurations was 0,20 mmA. Due to this target intensity especially during the impingement angle investigations the air pressure for acceleration of the shot must be adjusted to keep the peening intensity to the required level.

All related investigations with different shot types, impingement angles and coverages on the rotating-bending and alternating-fatigue samples have confirmed the life time increasing effect of a controlled shot peening operation at a coverage of ≥ 100 %.

During the research on the rotating-bending fatigue samples it was found that in nearly all cases a coverage with 20 % results in a reduction of cyclic fatigue strength.

The highest increase in cyclic fatigue strength on the rotating-bending fatigue samples tended to show the versions treated with high coverages (1200 %) and hard shot types (SSCW14, ASH110).

On the alternating-bending fatigue probes the variations with small impingement angles (30°, 45°) and high coverages showed significantly higher cyclic fatigue results in comparison to the same samples treated under 90° at the same peening intensity.

This result is even more interesting as the samples treated with small impingement angles showed the highest roughness values and a visible surface waviness.

The current investigation shows that by using the before described shot peening parameters the resulting residual compressive stress and the increase in dislocation density in the close surface area are the main factors for improvement of the cyclic fatigue performance of shot peened Ti-6Al-4V alloys.

The trials with small impingement angles at constant peening intensity are resulting in an directed deformation of the material in the close surface area, which possibly – this effect must be further investigated - provides a further resistance against the crack propagation and by that results in an additional increase in the overall fatigue strength.

Nearly no influence was seen by the significantly increased respectively changed surface roughness and topography on the life time by shot peening within this thesis.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Ziel der Arbeit	2
2.1.	Überdeckungsgrad	2
2.2.	Einstrahlwinkel	3
2.3.	Übersicht der Parameter	4
3.	Kenntnisstand	5
3.1.	Titan	5
3.1.1.	Kristallstruktur	5
3.1.2.	Titanlegierungen	6
3.1.3.	Titanlegierungen in der Luftfahrt	8
4.	Ermüdung von metallischen Werkstoffen	11
4.1.	Gesamtlebensdauer	11
4.1.1.	Wöhlerdiagramm	13
5.	Ermüdung von Titanlegierungen	15
5.1.	Einfluss Mikrostruktur und kristallografische Textur	15
5.2.	Mittelspannungseinfluss	17
5.3.	Mechanische Oberflächenbehandlung	18
5.4.	Thermomechanische Behandlung	22
6.	Verfestigungsstrahlen	24
6.1.	Einfluss des Verfestigungsstrahlens auf die Randschicht	24
6.2.	Kugelstrahl-Parameter	27
6.2.1.	Strahlmittel	27
6.2.2.	Überdeckungsgrad/Strahlzeit	27
6.2.3.	Strahlintensität (Almenintensität)	28
6.2.4.	Einfluss des Einstrahlwinkels auf die Almenintensität und die Werkstückoberfläche	31
7.	Material und Methoden	35
7.1.	Versuchswerkstoff	35
7.2.	Kugelstrahlanlage	37
7.3.	Strahlmittel	37
7.4.	Rauigkeitsmessungen	38
7.4.1.	Gemessene Rauigkeiten	38

7.4.2.	Welligkeit	40
7.5.	Eigenspannungsmessungen mittels Bohrlochverfahren	40
8.	Versuchsdurchführung	42
8.1.	Versuche mit unterschiedlichen Überdeckungsgrad und Strahlmitteltypen	43
8.1.1.	Verwendete Umlaufbiegeproben	43
8.1.2.	Verfestigungsstrahlbehandlung der Umlaufbiegeproben	43
8.1.2.1.	Verwendete Strahlmitteltypen	43
8.1.2.2.	Einrichten des Strahlprozesses und der Strahlintensität	44
8.1.2.3.	Erzeugung geforderter Überdeckungsgrade	44
8.1.2.4.	Messung der geforderten Überdeckungsgrade	46
8.1.3.	Umlaufbiegeversuche	47
8.2.	Versuche mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad	48
8.2.1.	Verwendete Wechselbiegeproben	48
8.2.2.	Eigenspannungsproben für die Einstrahlwinkeluntersuchung	49
8.2.3.	Verfestigungsstrahlbehandlung der Wechselbiegeproben	50
8.2.3.1.	Verwendetes Strahlmittel	50
8.2.4.	Einrichten des Strahlprozesses	50
8.2.5.	Einstrahlwinkel und Düsenabstand	50
8.2.6.	Konstruktion Probenmanipulator	51
8.2.7.	Durchführung der Verfestigungs-strahlbehandlung	52
8.2.8.	Ermittlung Strahlzeit/Überdeckungsgrad	52
8.2.9.	Ermittlung Strahlintensität/Strahl Druck	52
8.3.	Wechselbiegeversuch	54
9.	V Versuchsergebnisse	56
9.1.	Ergebnisse der Versuche an Umlaufbiegeproben mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden und Strahlmitteltypen	56
9.1.1.	Rauigkeit	56
9.1.2.	Eigenspannung	58
9.1.3.	Lebensdauer	62
9.1.4.	Mikroskopie	67
9.2.	Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad an Wechselbiegeproben	71

9.2.1.	Rauigkeit/Welligkeit	71
9.2.2.	Eigenspannung.....	75
9.2.3.	Lebensdauer.....	78
9.2.4.	Mikroskopie.....	84
9.2.5.	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	85
10.	Diskussion der Ergebnisse	88
10.1.	Überdeckungsgradversuche an Umlaufbiegeproben.....	88
10.1.1.	Rauigkeit.....	88
10.1.2.	Eigenspannung.....	89
10.1.3.	Lebensdauer.....	89
10.2.	Einstrahlwinkelversuche an Wechselbiegeproben.....	91
10.2.1.	Rauigkeit/Welligkeit	91
10.2.2.	Eigenspannungen.....	92
10.2.3.	Lebensdauer.....	92
11.	Zusammenfassung	94
12.	Abbildungsverzeichnis	97
13.	Literaturverzeichnis.....	103

Nomenklatur und verwendete Abkürzungen

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	[%]	Brucheinschnürung
E	[GPa]	Elastizitätsmodul
G	[kg]	Belastungsgewicht
σ	[MPa]	Biegespannung
M_B	[Nm]	Biegemoment
W	[m ³]	Widerstandsmoment
d	[mm]	Probendurchmesser im Prüfquerschnitt
k	[Grad]	Neigung der Zeitfestigkeitslinie
l_r	[mm]	Einzelmessstrecke
l_n	[mm]	Gesamtmessstrecke
l_t	[mm]	Taststrecke
l	[mm]	Länge
b	[mm]	Breite
h	[mm]	Höhe
N_I		Rissinitiierung
N_f		Rissfortschritt
N		Lastspielzahl
R_a	[μ m]	arithmetischer Mittenrauwert
R_z	[μ m]	gemittelte Rautiefe
R_{max}	[μ m]	maximale Rautiefe
R_t	[μ m]	maximale Einzelrautiefe
R_m	[MPa]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[MPa]	Streckgrenze
N_D		Eckschwingspielzahl
σ_{ges}	[MPa]	Festigkeit
σ_a	[MPa]	Spannungsamplitude
σ_D	[MPa]	Dauerfestigkeit
σ_E	[MPa]	Eigenspannungen
σ_m	[MPa]	Mittelspannung
$\Delta\sigma_m$	[MPa]	Mittelspannungsverschiebung

$\Delta\sigma_l$	[MPa]	Randfestigkeitssteigerungseffekt
X	[mm]	Tiefe
v	[m/s]	Strahlmittelgeschwindigkeit
p	[bar]	Luftdruck/Strahldruck
d	[mm]	Durchmesser/Strahlmitteldurchmesser
t	[s]	Zeit/Strahlzeit
HV _s	[HRC]	Strahlmittelhärte
HV _w	[HRC]	Werkstückhärte
i	[mmA]	Strahlintensität in Almen
HV(z)	[HRC]	Härtetiefenverlauf
wt	[%]	Gewichtsanteil
W _t	[μm]	Wellentiefe
W	[Nm]	Widerstandsmoment
M	[Nm]	Biegemoment
φ	[Grad]	Einstrahlwinkel
S	[mm]	Düsenabstand

Abkürzungen

CFK	Carbonfaser verstärkter Kunststoff
CRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic
DES	Druckeigenspannung
EP	Elektropolierte Referenzprobe
HCF	High Cycle Fatigue
LCF	Low Cycle Fatigue
MP	Mechanisch polierte Referenzprobe
REM	Rasterelektronenmikroskopie

1. Einleitung

Das Verfestigungsstrahlen, häufig auch Kugelstrahlen genannt, ist ein mechanisches Oberflächenbearbeitungsverfahren mit dem Ziel die Leistungsfähigkeit zyklisch belasteter metallischer Bauteile gegenüber Ermüdung oder Korrosionserscheinungen zu verbessern.

Bereits in den 1930er Jahren wurde der positive Effekt der zu diesem Zeitpunkt meist noch eher dem Reinigungsstrahlen zuzuordnenden Verfahrens bei automobilen und im Zuge des 2. Weltkrieges auch immer häufiger luftfahrttechnischen Anwendungen genutzt. Anstrengungen das „unkontrollierte“ Reinigungsstrahlen (Blasting) in ein „kontrolliertes“ Verfestigungsstrahlen zu überführen resultierte in ersten militärischen Spezifikationen des US Army, Navy und Air Force im Jahre 1940 [1].

Über die Jahrzehnte ist das nunmehr „kontrollierte“ Kugelstrahlen zu einem unverzichtbaren Bestandteil in der Fertigung von lebensdauerkritischen Bauteilen in vielen Industriebereichen aber insbesondere der Luftfahrt geworden. Im Flugzeugbau werden sowohl Bauteile unterschiedlicher metallischer Legierungen aus der Struktur (Rumpf, Tragflächen, Leitwerke), dem Fahrwerk und dem Triebwerk verfestigungsgestrahlt um diese zum einen so leicht wie möglich aber dennoch so dauerhaft und sicher wie nötig gestalten zu können.

Bei den im Flugzeugbau eingesetzten Materialien handelt es sich meist um Legierungen des Aluminiums, Stahls oder Titans wobei insbesondere die Letzteren im Fahrwasser des rapiden Anstiegs an CFK Werkstoffen einen immer größeren Stellenwert im Bereich Flugwerk einnehmen.

Betrachtet man die Konstruktion moderner Strahltriebwerke insgesamt so befindet sich hier vermutlich bezogen auf den Bauraum die höchste Dichte an verfestigungsgestrahnten Bauteilen von denen ein nicht unbeträchtlicher Teil aus Titanlegierungen wie insbesondere Ti-6Al-4V gefertigt sind. Dies vor allem im Bereich des Verdichters für Bauteile wie Fan-/Verdichterschaufeln, Blisks und Trommeln aber auch in der Turbine in Bereichen außerhalb grenzwertiger Temperaturen für diesen Werkstoff.

Der häufig komplexe geometrische Aufbau dieser Komponenten stellt höchste Anforderungen an den Kugelstrahlprozess selber und zieht immer häufiger den Einsatz roboterbetriebener Anlagentechnik nach sich.

2. Ziel der Arbeit

Gerade die vorhandenen komplizierten zu strahlenden Geometrien und deren Erreichbarkeit führen beim industriellen Verfestigungsstrahlen zu einem dazu, dass häufig von dem in der Kugelstrahlindustrie genanntem „idealen“ Einstrahlen der Oberfläche unter 90° abgewichen und teilweise sehr flache Einstrahlwinkel verwendet werden müssen. Zum anderen werden hierdurch - aber auch aus diversen anderen Gründen bedingt - dieselben oder benachbarte Bereiche auch sowohl unter sehr geringen als auch sehr hohen Überdeckungsgraden beaufschlagt.

In der vorliegenden Arbeit wird systematisch die Auswirkung der Variation des Überdeckungsgrades und des Einstrahlwinkels auf das Ermüdungsverhalten von Ti-6Al-4V untersucht. Hierbei wurden drei für das Verfestigungsstrahlen von diesen Werkstoffen häufig verwendete Strahlmittelsorten (ASR110, ASH110, SCCW14) verwendet. Bei der Variation sowohl des Überdeckungsgrades (20/100/1200 %) als auch des Einstrahlwinkels ($30/45/60/90^\circ$) wurde darauf geachtet innerhalb der für das Verfestigungsstrahlen von Luftfahrtbauteilen zulässigen Grenzwerte für das Verfestigungsstrahlen zu bleiben [2] [3] [4] [5] [6].

Während die Untersuchungen bezüglich des Überdeckungsgradeinflusses an Umlaufbiegeproben durchgeführt wurden, kamen bei den Versuchen in Hinsicht auf den Einfluss des Einstrahlwinkels Wechselbiegeproben zum Einsatz.

Neben den zuvor angeführten Kugelstrahlvariablen (Strahlmittel, Überdeckungsgrad, Einstrahlwinkel) wurde die Strahlintensität in allen untersuchten Fällen konstant bei 0,20 mmA – oder zumindest annähernd daran - gehalten. Das heißt, dass insbesondere bei den Versuchen mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel die Strahlmittelgeschwindigkeit mittels Luftdruck angepasst werden musste, um immer die annähernd gleiche Durchbiegung des Almenmessstreifens zu gewährleisten.

2.1. Überdeckungsgrad

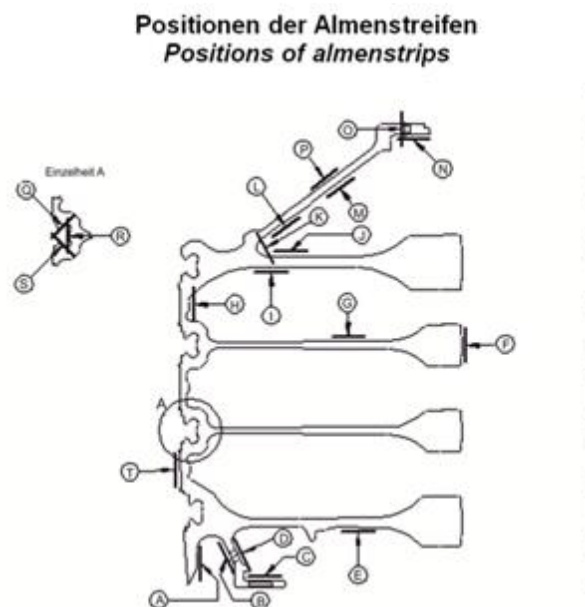
In Bezug auf den Einfluss des Überdeckungsgrades liegen bereits einige Untersuchungen insbesondere auf eine „unzureichende“ Deckung ($<100\%$) verschiedener gestrahlter Materialien vor [7] [8] [9] [10]. Die hierbei weitestgehend einhellige Meinung im Hinblick auf eine Reduzierung der Dauerfestigkeit bei

Überdeckungsgraden unter 100 % soll in dieser Arbeit an dem vorliegenden Ti-6Al-4V verifiziert werden.

Im Gegensatz zu geringen Überdeckungen liegen wesentlich weniger Erkenntnisse zu Überdeckungsgraden größer 100 % und einem Vielfachen hiervon vor [11] [12] [13] [14]. Insbesondere auf Basis der von einem namhaften Triebwerkshersteller spezifizierten maximal zulässigen Überdeckung von 1200 % (z.B. im Rahmen von Reparaturarbeiten auf bereits gestrahlten Oberflächen) konnte in Bezug auf den hier verwendeten Ti-6Al-4V keine vorliegenden Daten und Ergebnisse in der Literatur gefunden werden.

2.2. Einstrahlwinkel

Betrachtet man die in heutigen Strahltriebwerken eingesetzten Bauteile (siehe Abbildung 1) erkennt man schnell die Schwierigkeit der Erreichbarkeit und die damit zwangsläufig verbundene Abweichung vom „idealen“ Einstrahlwinkel von 90° in schwer zu erreichenden Bereichen insbesondere der innen aber teilweise auch außen gelegenen Strahlbereiche des Bauteils.



**Abbildung 1: (a) aufgeschnittene Trommel aus der Turbine eines Strahltriebwerks aus Ti-6Al-4V
(b) alphabetisch bezeichnete Almenstreifenpositionen/Strahlbereiche**

Geht man bei der in Abbildung 1 als Beispiel dargestellten und zur besseren Veranschaulichung aufgeschnittenen Turbinentrommel davon aus, dass die im

Innenbereich liegenden Kavitäten nur mit einer das Strahlmittel unter 90° abwerfenden in die Mittelachse eintauchenden Strahllanze erreicht werden können, erklären sich schnell weit von 90° abweichende Aufprallwinkel in den unterschiedlichsten Bereichen. Dieser Tatsache wird neben der Überdeckungsgradkontrolle z.B. mittels Endoskop in schwer zugänglichen Bereichen zusätzlich mit der Abfrage und Einstellung der geforderten Intensitäten mittels Almenstreifen (siehe Abbildung 1(b)) in den mit Großbuchstaben markierten Bereichen Rechnung getragen.

In Anlehnung und auf Basis der Hersteller- und allgemein verfügbarer Kugelstrahlspezifikationen [3] [2] [6] [4] wurden für diese Arbeit verschiedene Einstrahlwinkel- in Kombination mit Überdeckungsgradvariationen untersucht.

2.3. Übersicht der Parameter

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss grenzwertiger aber noch immer spezifikationsgemäßer und industriell verwendeter Überdeckungsgrade und Einstrahlwinkel auf die Lebensdauer von Ti-6Al-4V zu untersuchen.

Tabelle 1 und 2 zeigen eine Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Ermüdungsproben, deren kugelstrahltechnische Behandlung mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden, Einstrahlwinkeln sowie deren Kombinationen:

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Verfestigungsstrahlparameter an den Umlaufbiegeproben

Probenart	Umlaufbiegeprobe		
Überdeckung [%]	20	100	1200
Einstrahlwinkel [Grad]	90		
Strahlmittel	ASR110, ASH110, SCCW14		

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Verfestigungsstrahlparameter an den Wechselbiegeproben

Probenart	Wechselbiegeprobe	
Überdeckung [%]	100	1200
Einstrahlwinkel [Grad]	30, 45, 60, 90	
Strahlmittel	ASR110	

3. Kenntnisstand

3.1. Titan

Die Entdeckung des Werkstoffes Titan geht auf den Berliner Chemiker Martin Klaproth zurück, der 1795 bei Untersuchungen des Quarzes Rutil, das Oxid eines bis dahin unbekannten Elements fand.

Bei der Namensgebung bediente man sich der griechischen Mythologie und benannte es nach den Titanen, den Kindern des Uranos und der Gaia, welche Ihrem Vater verhasst waren und daher im Erdinneren gefangen gehalten wurden.

In der Erdkruste gehört Titan zu den zehn häufigsten Elementen, kommt jedoch nur chemisch gebunden als Bestandteil von Mineralien vor. Erst der Ende der 1930er Jahre von William Justin Kroll entwickelte und 1940 patentierte Kroll-Prozess, der die großtechnische Reduktion von Titan-tetrachlorid mit Magnesium beinhaltet, erlaubte Titan für kommerzielle Anwendungen zu erschließen [15].

Das Titan gehört nach heutiger Einteilung der 118 bekannten Elemente des Periodensystems zu den Nichteisen- und Leichtmetallen. Mit einer Dichte von $4,51\text{g/cm}^3$ ist das Titan das schwerste Leichtmetall. Fast doppelt so schwer wie Aluminium weist es jedoch nur etwa die Hälfte des spezifischen Gewichts von Eisen oder Nickel auf [16].

3.1.1. Kristallstruktur

Während Reinsttitan bei Temperaturen $< 882\text{ °C}$ als α -Titan vorliegt, kristallisiert es bei höheren Temperaturen zum β -Titan um. Wesentlicher Unterschied ist hierbei die Gittermodifikation, welche beim α -Titan als hexagonal dichteste und beim β -Titan als kubisch raumzentrierte Kugelpackung vorliegt (Abbildung 2).

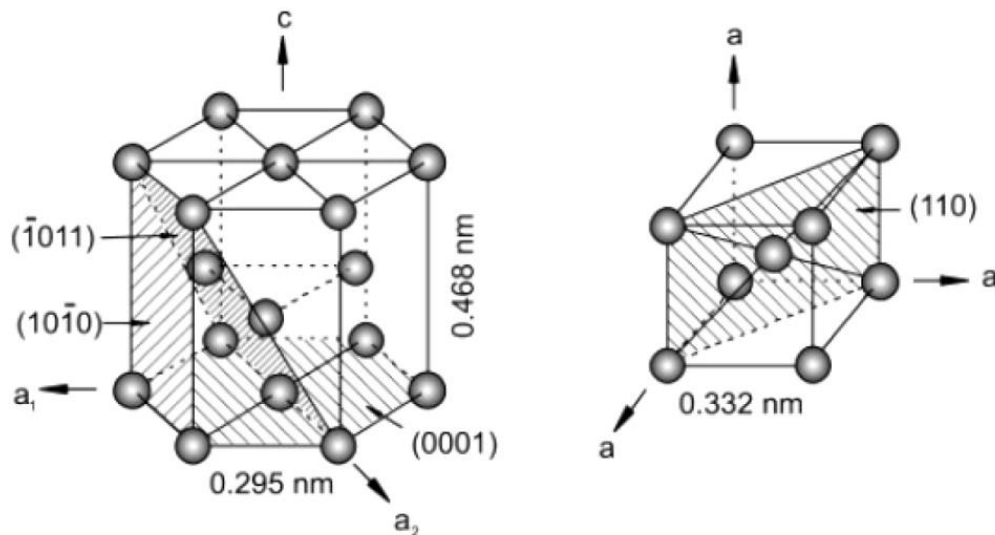


Abbildung 2: Gitterstrukturen der hexagonal dichtest gepackten α - und der kubisch raumzentrierten β -Phase [16]

Der Übergang von der einen in die andere Struktur wird dabei als allotrope Umwandlung bezeichnet und ist von maßgeblicher Bedeutung für die vielseitige Verwendbarkeit der unterschiedlichen Titanlegierungen.

3.1.2. Titanlegierungen

Derzeit gibt es weit über 100 Legierungen von Titan, von denen aber höchstens 20 – 30 kommerziell genutzt werden. Dabei entfallen auf Ti-6Al-4V alleine fast 50 % aller heutigen Anwendungen.

Die unterschiedlichen Gefüge werden hierbei mittels komplexer thermischer und mechanischer Behandlungen erzielt deren Abfolge aus verschiedenen Lösungsglüh-, Verformungs-, Rekristallisations-, Auslagerungs- und Spannungsfreiglühbehandlungen bestehen kann.

Gewöhnlich werden Titanlegierungen in α -, ($\alpha+\beta$)- und β -Legierungen eingeteilt mit weiteren Unterteilungen im Near- α - und metastabile β -Legierungen.

Die chemische Zusammensetzung bestimmt hierbei primär den Volumenanteil der Phasen α und β (Abbildung 3). Aufgrund der begrenzten Verformungsmöglichkeiten hexagonal dichtest gepackter Kristallstrukturen ist die α -Phase weniger duktil im Vergleich zur kubisch raumzentrierten β -Phase.

Da der Diffusionskoeffizient der α -Phase um mehr als zwei Größenordnungen geringer als der der β -Phase ist, nimmt mit steigendem Aluminiumgehalt und

entsprechender α -Stabilisierung der Kriech- und Oxidationswiderstand zu, während sich gleichzeitig Duktilität und Verformungsvermögen verschlechtern [16].

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Ti-6Al-4V handelt es sich um eine ($\alpha + \beta$)-Legierung bei der beide Phasen nebeneinander vorliegen (Abbildung 3). Beide Gefügearten können sowohl in feiner als auch in grober Verteilung in unterschiedlicher Erscheinungsform (globular, lamellar) vorliegen, wobei der Einfluss der verschiedenen Gefüge auf das mechanische Verhalten von Titanlegierungen Gegenstand zahlreicher Untersuchungen ist.

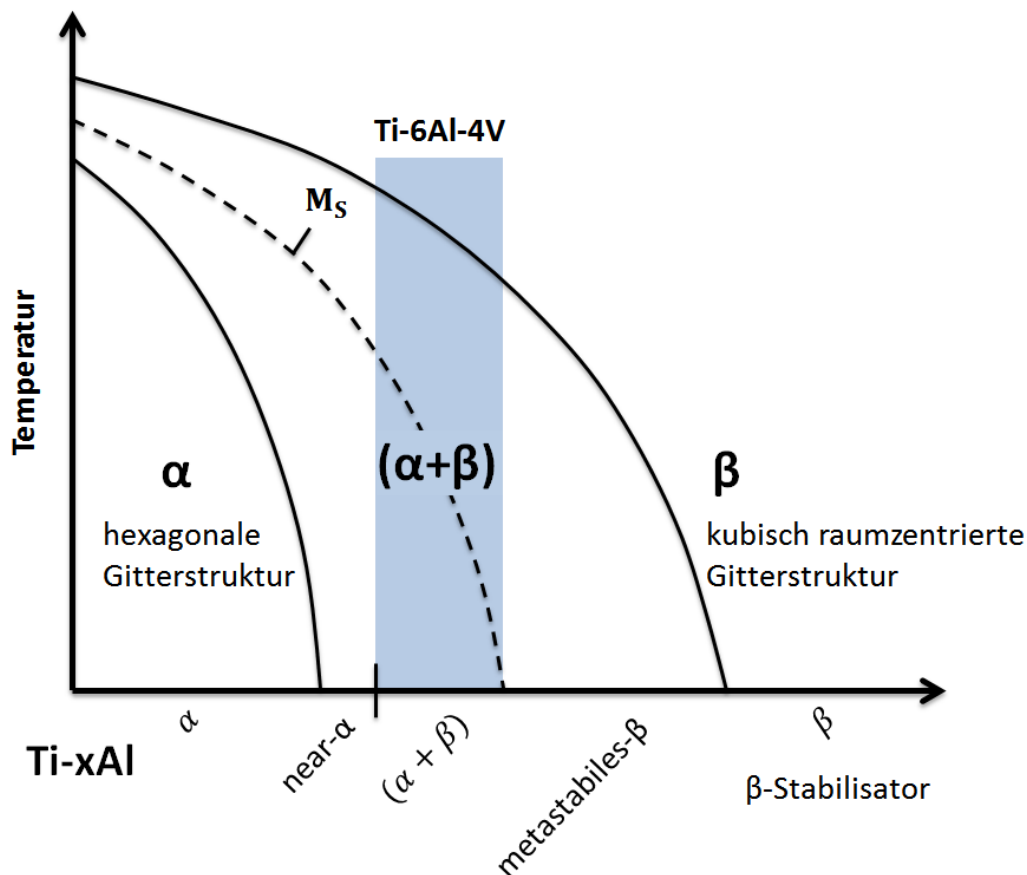


Abbildung 3: Legierungsklassen in Abhängigkeit vom Aluminium Anteil im Titan inkl. der Zuordnung von Ti-6Al-4V [17]

Der wesentliche Erfolg der Anfang der 1950er Jahre im Illinois Institute of Technology entwickelten Ti-6Al-4V Legierung liegt hierbei zum einen in den sehr ausgewogenen technischen Eigenschaften (Tabelle 3) und der Tatsache, dass diese die mit Abstand am besten untersuchteste Titanlegierung ist. Letzteres macht den Ti-6Al-4V in der zwangsläufig sehr sicherheitsorientierten Luft- und Raumfahrtindustrie zu der bis heute führenden Titanlegierung.

Tabelle 3: Eigenschaften von α , ($\alpha + \beta$) und β -Ti-Legierungen [16]

	α	($\alpha + \beta$)	β
Dichte	+	+	-
Festigkeit	-	+	++
Duktilität	-/+	+	+/-
Bruchzähigkeit	+	-/+	+/-
Zeitstandfestigkeit	+	+/-	-
Korrosionsverhalten	++	+	+/-
Oxidationsverhalten	++	+/-	-
Schweißbarkeit	+	+/-	-
Kaltverformbarkeit	--	-	-/+

3.1.3. Titanlegierungen in der Luftfahrt

Titanwerkstoffe zeichnen sich für die Verwendung im Luftfahrtbereich insbesondere durch Ihre hohe Festigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte und Ihre Korrosionsbeständigkeit aus. Im speziellen deren gute Verwendbarkeit in direkter Verbindung mit der zuletzt rapide zunehmenden Anzahl von CFK Bauteilen, hat zu einem ebenfalls signifikanten Anstieg des Titan Anteils am Strukturgewicht moderner Flugzeuge und Flugtriebwerke wie z.B. der Boeing B787 „Dreamliner“ oder AIRBUS A350 XWB geführt (Abbildung 4).

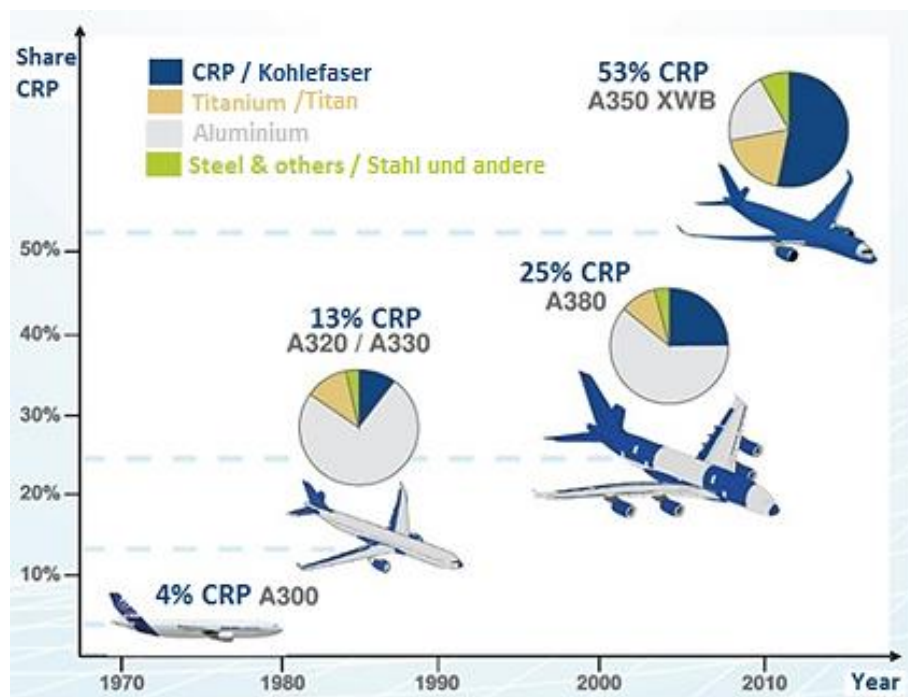


Abbildung 4: Materialmix moderner Flugzeuge [18]

Dabei steht im Zellenbau zum einen die Gewichtseinsparung auf Grund der hohen spezifischen Festigkeit der Titanlegierungen häufig im Vordergrund. Hierbei werden sowohl höherfeste Stahlbauteile als auch Aluminiumbauteile durch Titan ersetzt – letztere insbesondere dann, wenn es beim direkten konstruktiven Kontakt von Aluminium mit CFK Korrosionsprobleme geben könnte.

Bereits deutlich länger und verbreiteter werden Titanlegierungen im Triebwerksbau eingesetzt. So machen diese heute ca. 30% des Gesamtgewichtes eines modernen Strahltriebwerkes aus (Abbildung 5).

Material-Mix eines modernen Strahltriebwerks

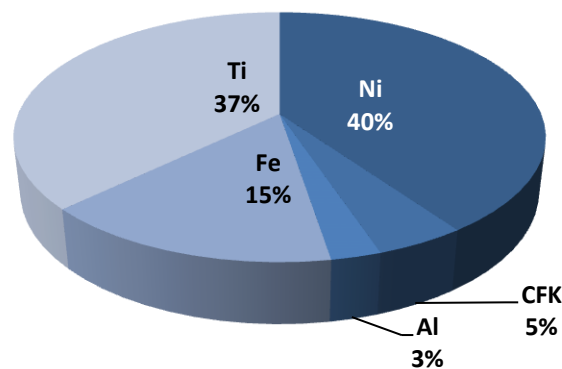


Abbildung 5: Anteil von Werkstoffen am Strukturgewicht moderner Triebwerke [16]

Bereits Anfang der 1950er Jahre waren es die Hersteller Pratt & Whitney in den USA und Rolls-Royce in UK die auf den Einsatz der modernen Titanlegierungen im Strahltriebwerk setzten und deren Anteil bis heute kontinuierlich steigerten. Dabei ist das Ti-6Al-4V zwar bis heute die am weitesten verbreitete Legierung allerdings sind zumindest im Triebwerksbau bereits erste Tendenzen einer Verschiebung zu den warmfesten Near- α -Legierungen, im ersten Schritt als Ersatz zu den wesentlich schwereren hochwarmfesten Nickel Legierungen, erkennbar.

Zu den am meisten aus Ti-6Al-4V hergestellten Triebwerkskomponenten zählen Verdichterschaufeln bis hin zur Fan-Schaufel, Verdichterscheiben, Trommeln und die modernen Blisks als aus einem Stück gefertigten Schaufeln und Scheiben (Blade und Disk: Blik).

Da Bauteile wie die Fan-Schaufeln und –scheiben nur niedrigen Temperaturen ausgesetzt sind, werden sie üblicherweise aus der Legierung Ti-6Al-4V hergestellt. Die maximale Einsatzgrenze dieser Legierung liegt bei etwa 315 °C, so dass auch noch die Kompressorscheiben und -schaufeln der ersten 4 bis 5 Reihen des Verdichters (Niederdruckverdichter) aus demselben Material hergestellt werden. Im Hochdruckverdichter kommen im Bereich der Titanlegierungen dann jedoch nur noch die warmfesten Near- α -Legierungen zum Einsatz [16].

4. Ermüdung von metallischen Werkstoffen

4.1. Gesamtlebensdauer

Wesentlichen Einfluss auf die Gesamtlebensdauer eines Bauteils hat die Zeitdauer bis zur Rissinitiierung im oberflächennahen Bereich als auch die Dauer der darauffolgenden Mikrorissausbreitung. Der Zeitraum der Makrorissausbreitung bis zum finalen Gewaltbruch fällt dagegen in aller Regel eher gering aus.

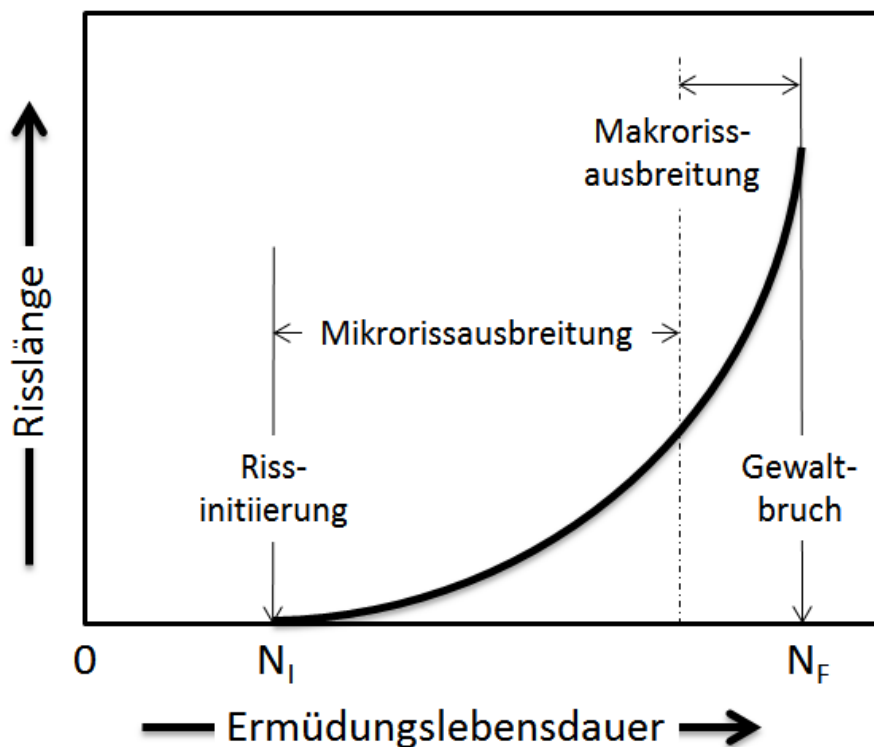


Abbildung 6: Verschiedene Phasen der Gesamtlebensdauer in Bezug auf Risse

Bei einer Wechselbelastung setzt sich die Gesamtlebensdauer eines zunächst rissfreien Bauteils aus der Zeitspanne bis zur Rissinitiierung (N_I) und der Dauer von Mikro- und Makrorissausbreitung zusammen (Abbildung 6). In der letzten Phase des Bruchvorganges beendet der sogenannte Rest- oder Gewaltbruch die Funktion des Bauteils final [9] [19] [20] [21]. Die verschiedenen Abschnitte Rissinitiierung, Rissfortschritt und Gewaltbruch sind häufig auch an den Bruchstellen noch gut ersichtlich (Abbildung 7) [22].

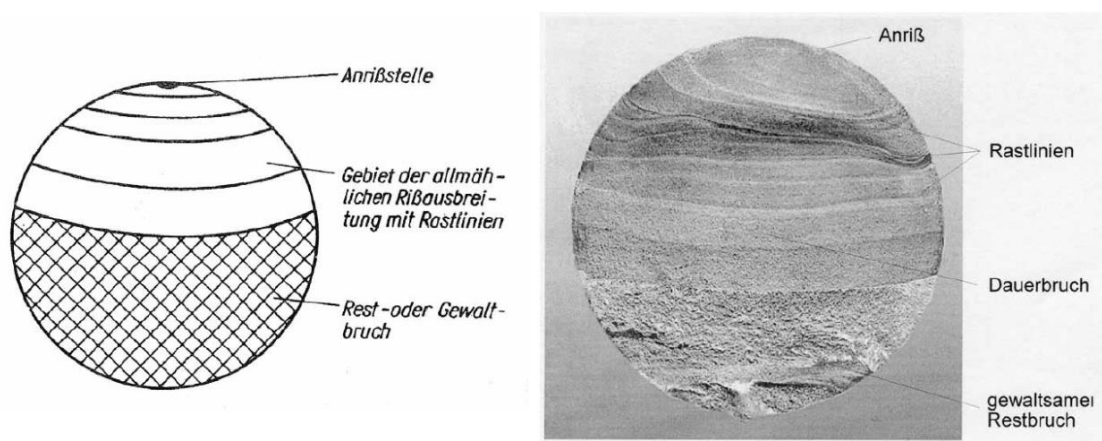


Abbildung 7: Makroskopisches Aussehen eines Ermüdungsbruchs (a) schematisch (b) Realbeispiel [22]

Versuche mit hohen Spannungs- oder Dehnungsamplituden an Titanlegierungen haben gezeigt, dass der Anteil bis zur Rissinitiiierung an der Gesamtlebensdauer sehr kleine Werte annehmen kann (z.B. $N_i/N_F = 0,01$) [23] [24]. Deshalb bestimmt der Widerstand gegen Rissausbreitung die Lebensdauer unter LCF-Beanspruchung.

Mit abnehmender Belastungsamplitude nimmt der Anteil der Rissinitiiierung an der Gesamtlebensdauer kontinuierlich zu. Demzufolge gilt die Schwingfestigkeit als höchste ohne Dauerbruch ertragbare Spannungsamplitude für eine sehr hohe Zyklen Zahl (z.B. 10^7) auch als eine gute Abschätzung für den Widerstand gegen Ermüdungsrisssbildung in den typischerweise defektfreien Titanwerkstoffen [16].

In der Regel erfolgt bei technischen Bauteilen die Rissinitiiierung an der Bauteiloberfläche was insbesondere dann der Fall ist, wenn diese auf Biegung belastet wird. Dabei entstehen in den äußersten Fasern die höchsten Spannungen bei denen insbesondere die Zugspannungen über die Anzahl der Lastwechsel zunächst zu Mikrorissen führen, welche sich dann in Abhängigkeit der Lastwechselzahl immer weiter ausbreiten. Hierbei können konstruktionsbedingte Übergänge, Radien und Bohrungen zusätzlich wie Kerben wirken an denen Ermüdungsrisse bevorzugt starten.

4.1.1. Wöhlerdiagramm

Die Untersuchung zyklisch beanspruchter Bauteile wird entweder mittels kraft- oder spannungskontrollierter Versuche im Wöhlerdiagramm dargestellt.

Die bis zum Versagen der Probe bei unterschiedlich hohen Lastamplituden (oder Spannungsamplituden) ermittelten Schwingspielzahlen N werden horizontal gegen Amplitudenwerte (daher „Horizonte“) aufgetragen. Versagenskriterium ist meist der vollständige Probenbruch, kann aber auch ein Anriss definierter Größe oder ein bestimmter Steifigkeitsabfall sein.

Zur Ermittlung einer Wöhlerkurve werden auf unterschiedlichen Spannungshorizonten Schwingfestigkeitsversuche durchgeführt und die entsprechenden Anriss- oder Bruchschwingspielzahlen zu den jeweils untersuchten Spannungsamplituden in einem halb- oder doppellogarithmischen Diagramm aufgetragen. Abbildung 8 zeigt schematisch eine Wöhlerkurve in doppellogarithmischer Darstellung.

Grundsätzlich kann eine Wöhlerlinie in den Kurzzeitfestigkeits-, den Zeitfestigkeits- und den Dauerfestigkeitsbereich eingeteilt werden. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich überwiegen die plastischen Dehnungen, im Langzeitfestigkeitsbereich die elastischen Dehnungen. Sowohl der Zeitfestigkeits- als auch der Dauerfestigkeitsbereich lassen sich bei einer doppellogarithmischen Auftragung durch zwei Geraden annähern.

Hierbei unterscheidet man im Wesentlichen drei Bereiche (Abbildung 8). Im Bereich von $N < 10^4$ spricht man von Kurzzeitfestigkeit oder LCF (Low Cycle Fatigue), oberhalb von $N > 10^5$ liegt die Langzeitfestigkeit HCF (High Cycle Fatigue) vor [25] [26].

Als Wechselfestigkeit wird die höchste ertragbare Spannungsamplitude, die bei 10^7 Lastwechseln nicht zum Versagen des Bauteils führt bezeichnet [27] [28] [29].

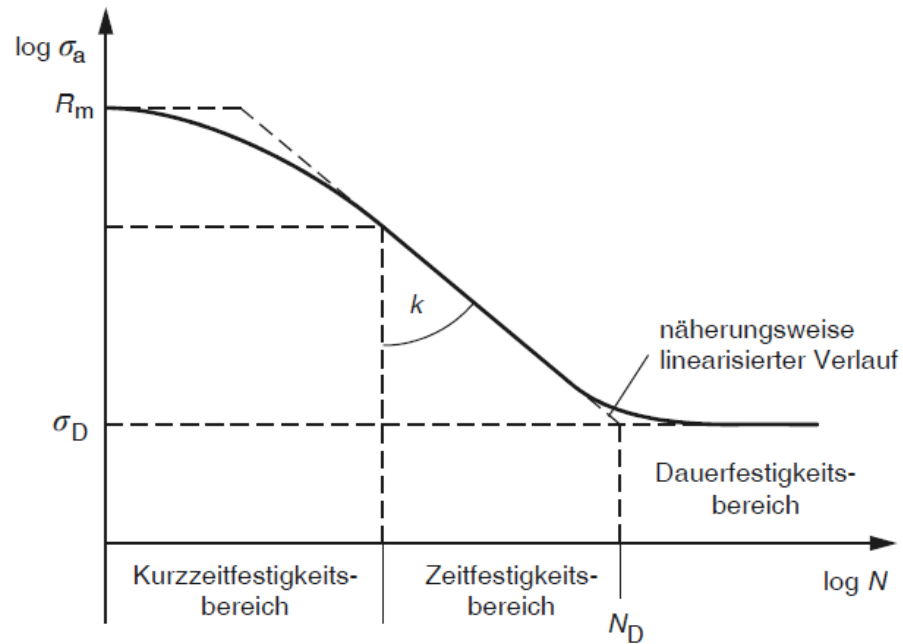


Abbildung 8: Wöhlerdiagramm

Im Bereich der Zeitfestigkeit gilt:

$$N = N_D \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_D} \right)^{-k} \quad \text{für } \sigma_a \geq \sigma_D$$

wobei k die Neigung der Zeitfestigkeitslinie ist. Im Bereich $\sigma_a < \sigma_D$ ist die Lebensdauer rein theoretisch unendlich. N_D wird als Eckschwingspielzahl bezeichnet, die den Schnittpunkt der Zeitfestigkeits- und Dauerfestigkeitsgeraden definiert [30] [31] [32].

5. Ermüdung von Titanlegierungen

Betrachtet man die Bauteile die z.B. im Flugzeugbau aus Titanlegierungen im allgemeinen und Ti-6Al-4V im speziellen gefertigt werden, so fällt auf, dass es sich hierbei nahezu ausschließlich um sicherheitsrelevante Komponenten handelt, deren Versagen katastrophale Auswirkungen auf das System und deren Umgebung nach sich ziehen würde. Weiterhin unterliegen viele dieser Bauteile einer Wechselbelastung welche einen signifikanten Einfluss auf die Ermüdung und damit der Lebensdauer der jeweiligen Komponenten nimmt.

Das Ermüdungsverhalten von Titan und dessen Legierungen wird im Wesentlichen von folgenden werkstoffkundlichen Einflussfaktoren geprägt:

- Mikrostruktur und kristallografische Textur
- Mittelspannung
- Mechanische Oberflächenbehandlung
- Thermomechanische Behandlung

5.1. Einfluss Mikrostruktur und kristallografische Textur

Je nach Legierungsklasse nehmen

- Korngrösse bzw. Phasenabmessung und -anordnung,
- Aushärtungszustand,
- Grad der Kaltverformung,
- Höhe der elastischen Konstanten und
- Kristallografische Textur

Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Ti-6Al-4V handelt es sich um ein typischen ($\alpha + \beta$)-Titan bei dem die Ermüdungseigenschaften sehr stark durch die Morphologie

und Anordnung der beiden Phasen beeinflusst werden. Grundsätzlich lassen sich lamellare, globulare und bimodale Mikrostrukturen einstellen. Die entsprechenden Strukturen nehmen hierbei bereits Einfluss auf die statischen Festigkeiten wie z.B. die Zug- oder Dehngrenze des Materials. Die höchsten Festigkeitswerte stellt man bei sehr feinen globularen Strukturen mit kleiner α -Korngröße fest.

Selbiges Verhalten zeigt sich auch bei der Dauerschwingfestigkeit, welches bei möglichst kleinen globularen Körnern oder Lamellen im Lamellargefüge am höchsten ist.

Hintergrund hierfür sind die Rissbildungsorte in den jeweiligen Mikrostrukturen. Bei den in dieser Arbeit tendenziell vorliegenden globularen Strukturen bilden sich Ermüdungsrisse in den Gleitbändern der α -Körner weshalb die Schwingfestigkeit bei zunehmend feineren Strukturen mit der Dehngrenze korreliert und somit ansteigt.

Auch bei der Mikrorissausbreitung zeigt sich die Tendenz des wesentlich schlechteren Verhaltens und somit einer schnelleren Mikrorissausbreitung bei grob lamellaren gegenüber globularen Strukturen. Umgekehrtes Verhalten beobachtet man nur bei der finalen Makrorissausbreitung, welche in der Summe aber den geringsten Anteil an der Gesamtermüdungslebensdauer von Bauteilen aus diesen Werkstoffen hat [16].

($\alpha+\beta$) - Legierungen weisen auf Grund der anisotropen hexagonalen Gitterstruktur der α -Phase deutlich richtungsabhängigere mechanische Eigenschaften auf als die kubisch raumzentrierten β -Legierungen.

Für das in dieser Arbeit untersuchte Ti-6Al-4V mit der Möglichkeit der starken Variation der kristallografischen Textur wurden diese Effekte bereits eingehend untersucht [33] [34] [35] [36] [37] [38].

Durch entsprechende thermomechanische Behandlungen können dabei vier Grundtypen von Texturen erzeugt werden:

- Basalttextur
- Transversaltextur
- Mischtextur
- Schwach ausgeprägte Textur

Im Zusammenspiel mit den Umgebungsbedingungen (z.B. Luft oder Vakuum), der Belastungsrichtung (in Bezug zur Walzrichtung), zuvor angeführter Texturtypen und

Dabei ist bekannt, dass insbesondere die in dieser Arbeit untersuchte ($\alpha+\beta$)-Legierung bezüglich des Dauerschwingverhaltens sehr stark mittelspannungsempfindlich reagieren kann. Diese Reaktion wird als anormaler Mittelspannungseffekt bezeichnet. Hierbei ist bei niedrigen Zugmittelspannungen im Bereich der Raumtemperatur das Ermüdungsverhalten der Duplexstrukturen deutlich den rein lamellaren Strukturen unterlegen [40].

Der Betrag der anomalen Mittelspannung bei ($\alpha+\beta$) - Mikrostrukturen (globulare oder Duplexstrukturen) hängt dabei von der Belastungsrichtung und der kristallografischen Textur ab.

5.3. Mechanische Oberflächenbehandlung

Zu den typischen mechanischen Oberflächenbehandlungen gehören die zerspanenden Bearbeitungen wie z.B. Drehen, Fräsen und Bohren als auch nachgeschaltete Verfahren wie Verfestigungsstrahlen, Laser Shock Verfestigen, Rollieren.

Allen mechanischen Verfahren ist gemeinsam, dass sie Einfluss auf folgende Oberflächeneigenschaften nehmen:

- Oberflächenrauheit
- Eigenspannungen
- Versetzungsdichte (Kaltverfestigung).

Betrachtet man o.a. Oberflächeneigenschaften in Bezug auf deren Einfluss auf das Ermüdungsverhalten, so kann man dies wie in Tabelle 4 zusammenfassen [41] [16] [42]. Hieraus ergibt sich, dass sich die verschiedenen Oberflächenbehandlungen sowohl positiv und negativ auf die Ermüdungslebensdauer auswirken.

Tabelle 4: Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf das Ermüdungsverhalten [16]

Oberflächeneigenschaft	Rissinitiierung	Mikrorissausbreitung
Oberflächenrauheit	Beschleunigt	Kein Effekt
Druckeigenspannungen	Wenig Einfluss	Verzögert
Zugeigenspannungen	Beschleunigt	Beschleunigt
Versetzungsdichte (Kaltverfestigung)	Verzögert	Beschleunigt

Entsprechend dieser Übersicht führt eine höhere Oberflächenrauheit (z.B. durch Verfestigungsstrahlen) zu einer beschleunigten Rissinitiierung während Druckeigenspannungen auf diese Phase der Rissentstehung kaum Einfluss nehmen. Dagegen verzögern Druckeigenspannungen die Rissausbreitungsgeschwindigkeit während die im Vorzeichen umgekehrten Zugeigenspannungen sowohl die Rissinitiierung als auch den Rissfortschritt beschleunigen. Eine durch mechanische Bearbeitung (z.B. Drehen, Fräsen, Verfestigungsstrahlen) erhöhte Versetzungsdichte verzögert die Rissinitiierung bei gleichzeitiger Beschleunigung der Rissausbreitungsgeschwindigkeit auf Grund der geringeren Restduktilität.

Ein weiterer häufig zu beachtender Faktor ist, dass die durch eine mechanische Oberflächenbehandlung hervorgerufenen Veränderungen nicht zwingend stabil sind. So können Eigenspannungen durch Temperatureinfluss abgebaut und der Betrag der Kaltverfestigung/Versetzungsdichte sowohl durch Temperatur- als auch mechanischem Einfluss mittels Rekristallisation verringert werden. Weiterhin kann durch nachfolgende oder aufeinander aufbauende mechanische, chemische oder elektrochemische Verfahren die Oberflächenrauheit, in der Regel mit dem Ziel der Reduzierung, verändert werden.

Bei der mechanischen Herstellung und Bearbeitung von Bauteilen resultieren in Tabelle 4 angeführte Oberflächeneigenschaften aus einer Vielzahl von nacheinander ausgeführten Bearbeitungsschritten. Dabei können sich manche nur im oberflächennahen Bereich verändern (z.B. Verfestigungsstrahlen) während andere das Material wesentlich tiefer beeinflussen (z.B. Wärmebehandlungen).

Neben der Oberflächenrauheit, die offensichtlich und einfach messbar, ist spielen insbesondere Eigenspannungen und Kaltverfestigung/Versetzungsdichte eine wichtige Rolle in Bezug auf die Ermüdung von kritischen Bauteilen. Dabei ist es bekannt, dass durch eine maschinelle Bearbeitung in Abhängigkeit von den Verfahrensparametern sowohl Zug- als auch Druckeigenspannungen induziert werden, die dann positiv oder negativ Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer nehmen.

Um diesen meist zufälligen und damit „unkontrollierten“ Eigenspannungszuständen bei der Herstellung Rechnung zu tragen werden zyklisch belastete Bauteile häufig mit dem Ziel verfestigungsgestrahlt, die gestrahlten Bereiche in einen kontrollierten Zustand von Druckeigenspannungen zu versetzen. Obwohl durch das Verfestigungsstrahlen häufig rauere Oberflächen als im z.B. feingedrehten oder

polierten Zustand entstehen und damit die Rissbildungsphase schon vorweggenommen wird [43], wirken sich die oberflächennahen Druckeigenspannungen im Zusammenwirken mit den erhöhten Versetzungsdichten deutlich günstiger auf die Gesamtlebensdauer aus, da sie die Mikrorissausbreitung stark verzögern [44] [45] [46].

Hinzu kommt, dass durch die strahltechnisch eingebrachten Druckeigenspannungen die Entstehung der Rissinitiation in die Tiefe des Bauteils und somit unterhalb der nach der Strahlbehandlung rauen Oberfläche verschoben wird.

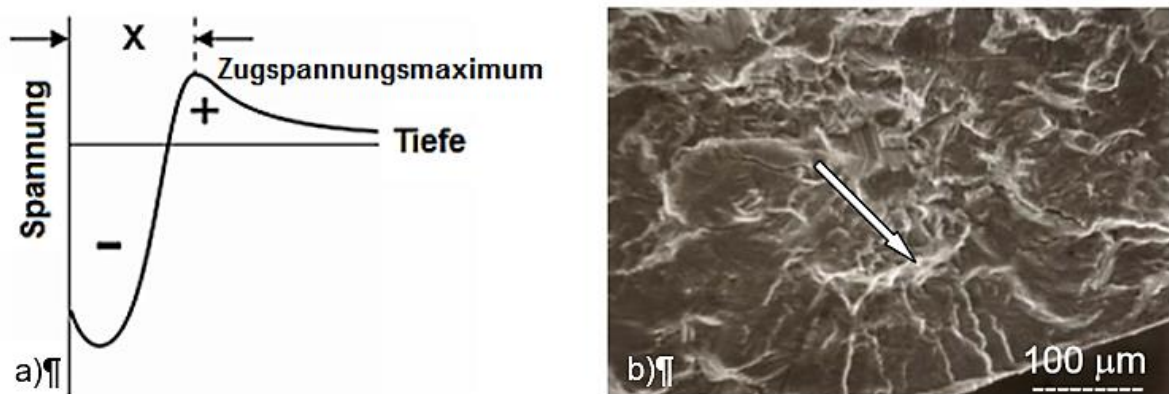


Abbildung 10: (a) Eigenspannungsprofil (schematisch) mit Darstellung Rissinitiation (X) (b) Rissinitiation unterhalb der Oberfläche einer verfestigungsgestrahlten Probe [47]

Hintergrund hierfür ist das Entstehen eines in Abhängigkeit von der Probengeometrie mehr oder weniger stark ausgebildeten Wechsels des Vorzeichens der Eigenspannungen mit einem Zugspannungsmaximum unterhalb der randschichtnahen Druckeigenspannung (Abbildung 10 (a)) [47] [48].

Die entstehenden Zugspannungen balancieren hierbei die durch das Verfestigungsstrahlen eingebrachten Druckspannungen und deren Betrag ist daher stark abhängig vom Bauteilquerschnitt.

Diesen Effekt kann man mithilfe einer PC basierten Software zur rechnerischen Simulation von Eigenspannungen nach dem Verfestigungsstrahlen der Firma Metal Improvement Company deutlich machen. In diesem PEENSTRESS genannten Programm kann man unterschiedliche Werkstoffe mithilfe Ihrer Materialkenndaten anlegen und sich u.a. auch die Verteilung von Eigenspannungen über verschiedenen Bauteilgeometrien und deren Querschnitt nach dem Bestrahlen mit verschiedenen Strahlmitteln (Stahl, Glas, Keramik) und Strahlintensitäten berechnen und anzeigen lassen.

In Abbildung 11 wurde hierbei für den beispielhaft ausgewählten Werkstoff Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo eine Platte mit dem Querschnitt von 1,5 mm (a) und 6 mm (b) beidseitig mit denselben Strahlparametern (0,3 mm Stahlgusskugel, 0,20 mmA) beaufschlagt und die Verteilung der Druck- und Zugeigenspannungen über den jeweiligen Bauteilquerschnitt mittels der Software berechnet und dargestellt.

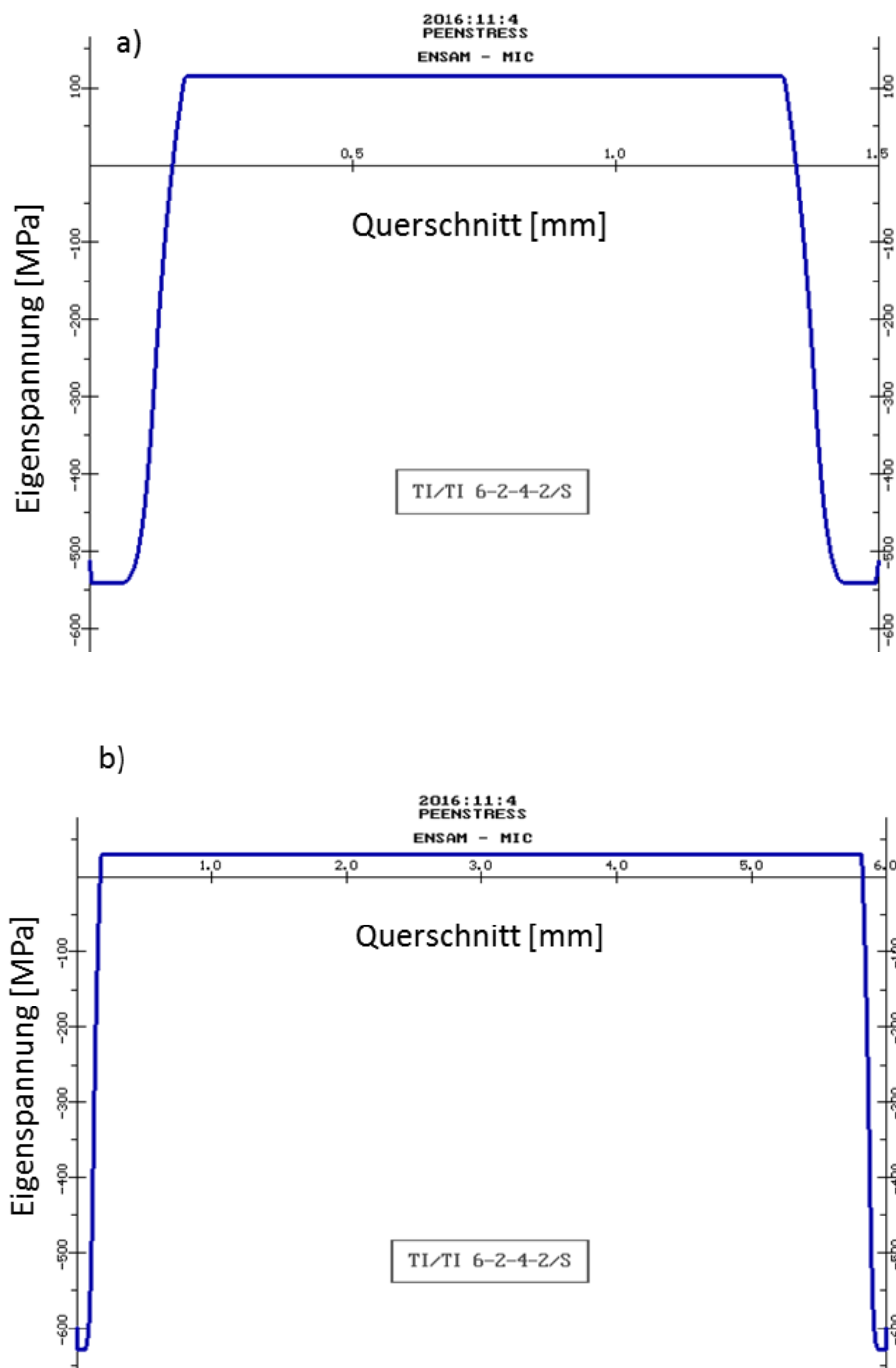


Abbildung 11: Darstellung der durch eine PC basierte Software (PEENSTRESS – Fa. METAL IMPROVEMENT COMPANY) berechneten Zug- und Druckeigenspannungen von mit gleichen Kugelstrahlparametern behandelten Bauteilen unterschiedlichem Querschnitts (a) 1,5 mm (b) 6 mm

Klar zu erkennen ist, dass bei dem geringeren Querschnitt von 1,5 mm (Abbildung 11 (a)) die sich ausbildende und balancierende Zugeigenspannung in der Bauteilmitte einen deutlich höheren Betrag als bei dem vergleichsweise dickwandigeren Bauteil (Abbildung 11 (b)) ausbildet.

Weiterhin ist auch zu erkennen, dass bei der hier dargestellten Platte mit 1,5 mm Querschnitt die maximal erreichten Druckeigenspannungen im randschichtnahen Bereich niedriger als bei der Platte mit 6 mm ausfallen.

Diesen Effekt stellt man messtechnisch auch an realen gestrahlten Bauteilen fest und geht auf die Beeinflussung durch die sich parameterabhängig unterschiedlich stark ausbildenden Zugeigenspannungen in der Bauteilmitte einher. Dabei fallen die Beträge der durch Verfestigungsstrahlen erzeugten randschichtnahen Druckeigenspannungen umso geringer aus je höher die Beträge der balancierenden Zugeigenspannungen im Bauteilinneren werden.

5.4. Thermomechanische Behandlung

Unter thermomechanischen Behandlungen versteht man im Allgemeinen die umformende Behandlung von Werkstoffen in Verbindung mit Wärmebehandlungen. Dabei können zunächst die thermische Behandlung und dann die Umformung erfolgen, wobei die Umformung sowohl bei hoher oder niedriger Temperatur durchgeführt werden kann.

Weiterhin gibt es auch thermomechanische Behandlungen bei denen bei einer definierten Temperatur umgeformt wird und dieser Prozeßschritt nachfolgend von weiteren thermischen Behandlungen ergänzt wird.

Ziel dieser thermischen in Kombination mit umformenden Behandlungen ist bestimmte Gebrauchseigenschaften des Werkstoffs für den späteren Einsatz der Bauteile zu optimieren [39].

Die oberflächennahe Mikrostruktur von Titanlegierungen kann mittels zuvor beschriebener thermomechanischen Methoden gezielt behandelt werden um z.B. im randschichtnahen Bereich den Rissbildungswiderstand zu erhöhen, während das Material und dessen Verhalten im Kern hiervon unberührt bleiben.

Die thermische Behandlung nimmt dabei idealer Weise gleichmäßig Einfluss auf die werkstofftechnischen Gebrauchseigenschaften wie Duktilität, Bearbeitbarkeit, Härte,

Bruchfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Kriechbeständigkeit über den gesamten Bauteilquerschnitt hinweg. Die Reaktion einer Titanlegierung auf die Wärmebehandlung hängt hierbei wesentlich von den Legierungsbestandteilen und deren Einfluss auf die α - β Umwandlung ab.

Im Gegensatz zu der sich auf das gesamte Werkstoffvolumen auswirkenden thermischen Behandlung kann insbesondere das Verfestigungsstrahlen und die damit einhergehende plastische Deformation der Oberfläche eine Kaltverfestigung lokal begrenzt im randschichtnahen Bereich erzeugen, welche sich deutlich von der rein thermisch eingestellten Struktur im Bauteilinneren unterscheidet [49] [50] [51] [52].

Technisch bedeutend ist dieses Verfahren der Kombination unterschiedlicher Werkstoffstrukturen insbesondere für Near- α -Legierungen und deren Einsatzorten mit hohen Temperaturen wie z.B. im Triebwerk eines Flugzeuges.

Für die in dieser Arbeit verwendete Legierung spielen solche gezielten Veränderungen der Phasenmorphologie zwischen der Bauteiloberfläche und dem Inneren eine untergeordnete Rolle, da die Einsatztemperaturen für die Legierung Ti-6Al-4V deutlich geringer ausfallen.

6. Verfestigungsstrahlen

6.1. Einfluss des Verfestigungsstrahlens auf die Randschicht

Verfestigungsstrahlen ist ein Kaltbearbeitungsverfahren das in aller Regel mit dem Ziel der Verbesserung der Ermüdungslebensdauer von zyklisch belasteten Bauteilen eingesetzt wird [53] [54] [55] [56] [57] [58]. Der international gebräuchliche Begriff „Shot Peening“ für diese Anwendung steht für Hämmern („peening“) mit Hilfe von rundem Strahlgut („shot“).

Beim Verfestigungsstrahlen werden durch gezielten Beschuss mit kugelförmigen Partikeln, die wie winzige Schmiedehämmer wirken, begrenzte plastische und elastische Verformungen durch die lokale Deformation und Hertz´sche Pressung in der Bauteilrandschicht erzeugt. Beide Wirkungen treten stets nebeneinander auf und werden durch die Strahlkenngößen beeinflusst. Die elastische Verformung induziert in der plastifizierten Zone hohe Druckeigenspannungen.

Um die Entwicklung von Kugelstrahleigenspannungen verstehen und bewerten zu können, ist es notwendig, die beim Strahlen ablaufenden Elementarvorgänge näher zu betrachten.

Grundsätzlich kann man zwischen zwei unterschiedlichen Deformationsprozessen unterscheiden. Zum einen wird angenommen, dass die unmittelbar an der Werkstückoberfläche gelegenen Werkstoffbereiche durch die Einschläge des Strahlmittels direkt plastisch gestreckt werden. Andererseits tritt in der Kontaktzone zwischen Strahlmittel und Strahlgut eine Hertz´sche Pressung auf, die kurzzeitig lokal einen inhomogenen dreiachsigen Spannungszustand bewirkt. Dadurch kann die Streckgrenze des Werkstoffs in einer bestimmten Oberflächenentfernung überschritten werden, so dass dort plastische Deformationen ablaufen [59] [60].

Abbildung 12 beschreibt die geschilderten Teilvorgänge schematisch. Beim Prozess der Streckung oberflächennaher Bereiche ist die Plastifizierung unmittelbar an der Oberfläche am stärksten und nimmt mit zunehmender Oberflächenentfernung ab. Man erkennt, dass die plastische Verformung der Randschicht durch darunterliegende, nur elastisch verformte Bereiche behindert wird, so dass sich ein Eigenspannungsverlauf mit Druckeigenspannungen an der Oberfläche und

darunterliegenden Zugeigenspannungen einstellt. Der Prozess der Hertz'schen Pressung führt zu der im rechten Bild gezeigten Verteilung der Spannungskomponenten im Bereich unterhalb der Kontaktstelle zwischen Strahlpartikel und Strahlgut [61].

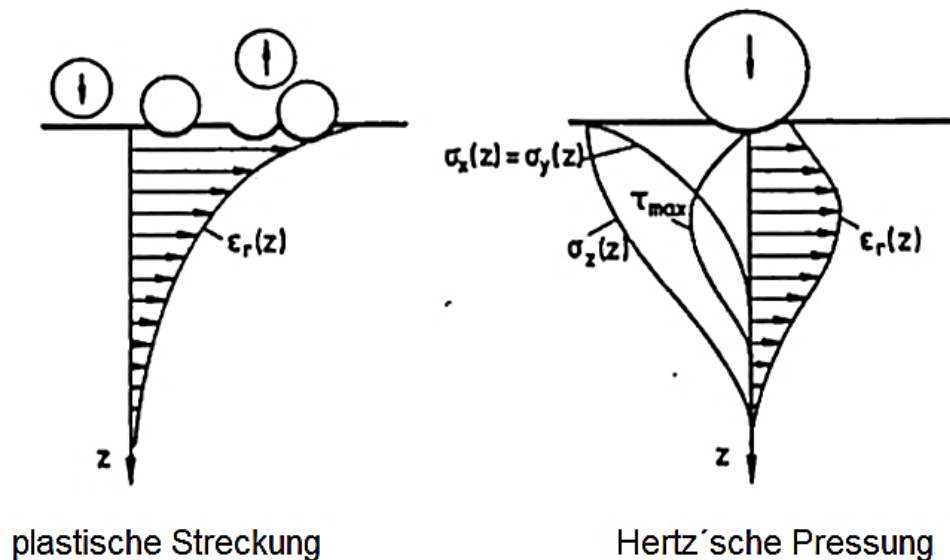


Abbildung 12: Schematische Beschreibung der Elementarprozesse beim Verfestigungsstrahlen [61]

Ebenfalls dargestellt ist die Tiefenverteilung der maximalen Hauptschubspannung. Wichtig ist, dass diese ihren Maximalwert in einer bestimmten Entfernung zur Oberfläche erreicht, so dass dort auch die stärksten plastischen Verformungen zu erwarten sind. Entsprechend tritt ein Eigenspannungsmaximum unter der Oberfläche auf.

Diese Modellvorstellungen vereinfachen die in Wirklichkeit auftretenden Verhältnisse sehr stark. Ungeachtet dessen gestatten sie, die in der Praxis beobachteten Strahleigenspannungen einzuordnen und zu erklären.

Der Einfluss unterschiedlicher Werkstoff- und Verfahrensparameter auf die sich ausbildenden Eigenspannungstiefenverläufe ist in Abbildung 13 zusammenfassend dargestellt. Eine Zunahme der aufgeführten Einflussgrößen verschiebt dabei die Kurve in die angegebenen Richtungen [62] [63].

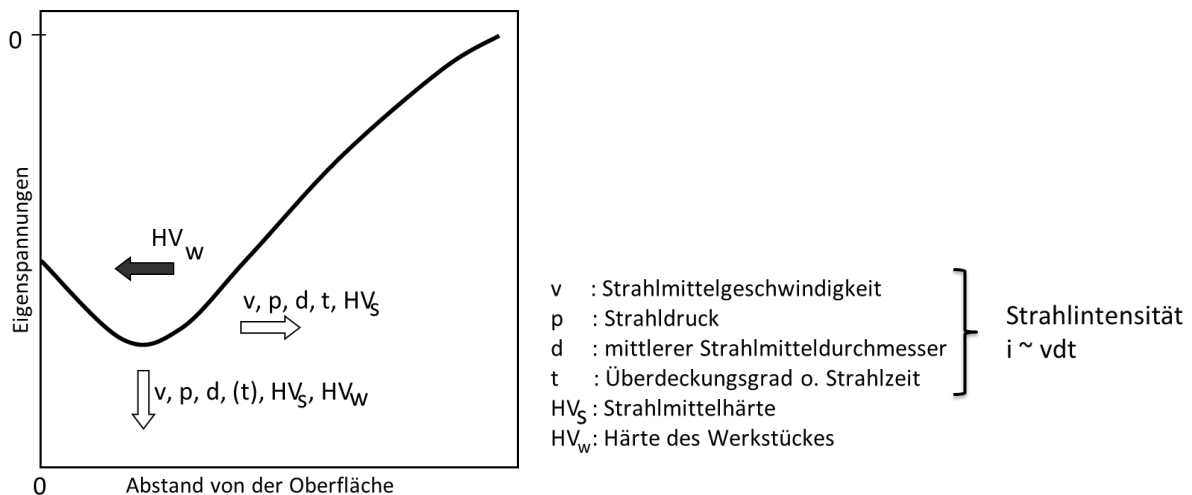


Abbildung 13: Auswirkung von Werkstoff- und Verfahrensparametervariationen auf die Ausbildung von Kugelstrahleigenspannungen [62]

Das Bauteil wird durch die induzierte Druckeigenspannung an bzw. unter der Oberfläche von externen Zugspannungen entlastet und die Dauerschwingfestigkeit und die Beständigkeit gegen Spannungsriß- und Schwingungsrißkorrosion wird gesteigert. Gleichzeitig wird die Entstehung und Fortpflanzung von Rissen behindert [64] [65].

Neben den Eigenspannungen in Längs- und Querrichtung wird auch die Halbwertsbreite, Versetzungsdichte, Härte und Rauigkeit vom Kugelstrahlprozess beeinflusst (Abbildung 14) [66].

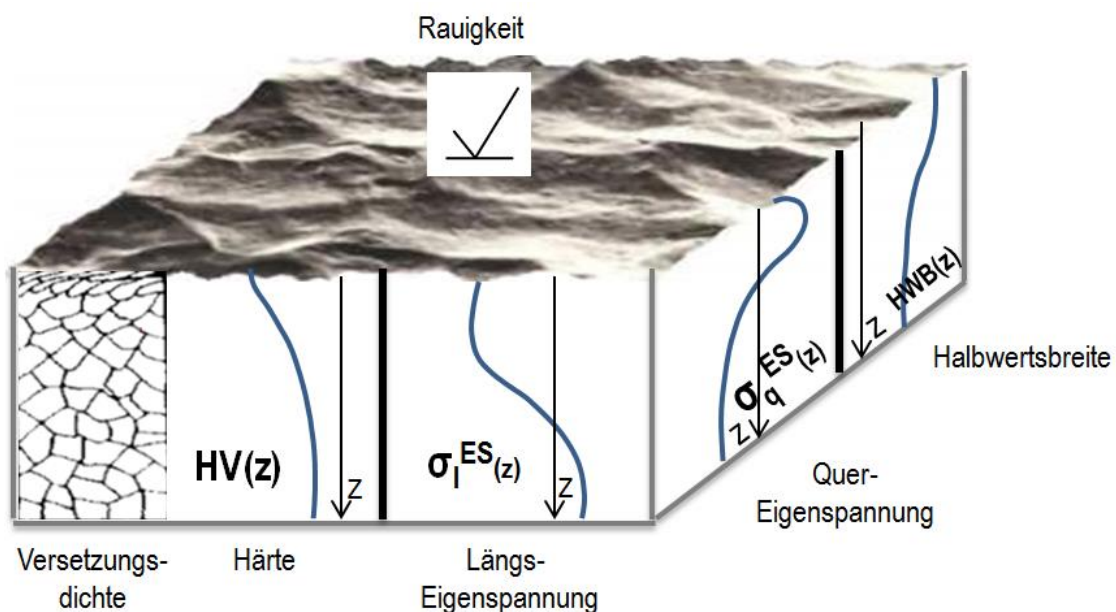


Abbildung 14: Vom Verfestigungsstrahlen beeinflusste charakteristische Randschichteigenschaften [66]

6.2. Verfestigungsstrahl-Parameter

Das Ergebnis der mechanischen Oberflächenbehandlung durch Verfestigungsstrahlen ist jeweils vom eingesetzten Verfahren und dessen Strahlparametern abhängig. Zu den wesentlichen Strahlparametern zählen:

- das Strahlmittel
- Überdeckungsgrad/Strahlzeit
- Intensität

In dieser Arbeit wurde sowohl das Strahlmittel (SCCW14, ASR110, ASH110) als auch der Überdeckungsgrad (20 %, 100 %, 1200 %) variiert. Eine weitere Variation war zudem der Einstrahlwinkel welcher aber indirekt in die Strahlintensität einfließt. Als Zielvorgabe für die Intensität wurde ein Wert von 0,20 mmA als gängiger Wert für die Bearbeitung von Ti-6Al-4V Bauteilen festgelegt.

6.2.1. Strahlmittel

Beim industriellen Verfestigungsstrahlen werden Strahlmittel aus Stahlguss, Drahtkorn, Glas und Keramik verwendet, die in spezifizierten Materialzusammensetzungen, Größen und Härten verfügbar sind [67].

Aus Gründen der Korrosionsvermeidung aber auch zur weiteren Steigerung der Dauerschwingfestigkeiten werden o.a. Strahlmitteltypen auch in Kombination mit z.B. Glasstrahlmitteln in sogenannten Dual-Strahlverfahren kombiniert.

In dieser Arbeit kamen mit SCCW14, ASR110 und ASH110 nur eisenhaltige Strahlmittel zum Einsatz.

6.2.2. Überdeckungsgrad/Strahlzeit

Der Überdeckungsgrad ist definiert als prozentualer Anteil der Oberfläche die mindestens einmal vom Strahlmittel getroffen wurde. Dabei ist es sehr schwierig eine Deckung oberhalb von 98 % genau zu messen. „Volle Überdeckung“ ist daher als der Zustand definiert bei dem zumindest 98 % der Oberfläche beaufschlagt wurde und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als 100 % Deckung bezeichnet.

Eine eventuell geforderte Überdeckung größer als die einfache Überdeckung (100 %) ist dabei ein entsprechendes Vielfaches der Strahlzeit die zum Erreichen der einfachen Überdeckung benötigt wurde [68].

Bei Bauteilen die in Hinsicht der Steigerung der Ermüdungslebensdauer gestrahlt werden ist in aller Regel zumindest eine Überdeckung von $\geq 100\%$ gefordert.

6.2.3. Strahlintensität (Almenintensität)

Die Strahlintensität wird historisch bedingt in Almen (entwickelt und patentiert durch John O. Almen) gemessen. Dabei steht der Almenwert für die Durchbiegung eines sogenannten Almenstreifens durch den Strahlprozess. Indirekt wird mittels dieser Methode die kinetische Energie des Strahlmittelstrom und somit als Durchschnittswert der jeweiligen kinetischen Energien aller hierin befindlichen Strahlpartikel gemessen.

Der Almenwert stellt eine wesentliche Messgröße zur Sicherstellung eines reproduzierbaren Strahlprozesses dar. Die hierin befindliche Energie steht in direkter Relation zu der in einem Bauteil erzeugten Druckeigenspannung.

Gemessen wird die Intensität anhand der Almenstreifen. Ein Almenstreifen besteht aus dem Federstahl SAE1070 (C67S) in einem definierten Behandlungszustand und liegt in 3 verschiedenen Dicken, die mit „N“, „A“ und „C“ bezeichnet werden vor.

Die Almenstreifen werden zur Kontrolle der Strahlintensität in einen normierten Halter eingespannt und einseitig verfestigungsgestrahlt. Dabei verwölben sie sich zur verfestigungsgestrahlten Seite hin. Die entstehende Bogenhöhe des Streifens wird mit einer Messuhr gemessen.

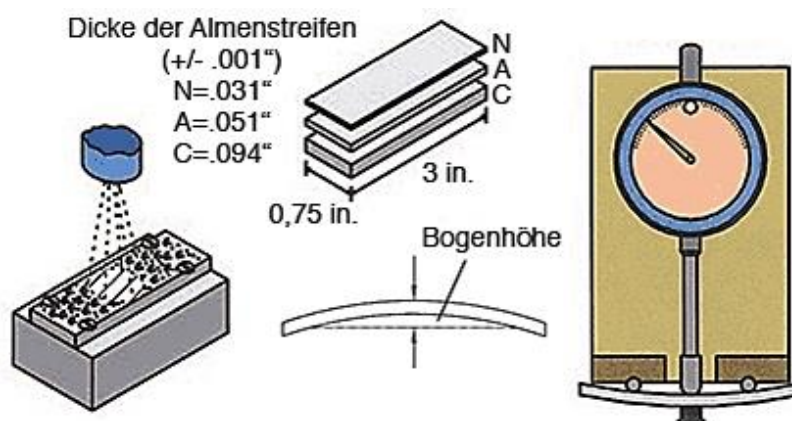


Abbildung 15: Almenstreifen zur Intensitätsmessung [65]

In weiteren Schritten werden immer neue Almenstreifen mit unterschiedlichen Strahlzeiten gestrahlt und so eine Sättigungskurve erstellt. Die Sättigung wird durch den Punkt auf der Kurve definiert, an dem bei Verdoppelung der Strahlzeit nur noch eine genau zehnpromtente Erhöhung der Bogenhöhe vorliegt (Abbildung 15) [69].

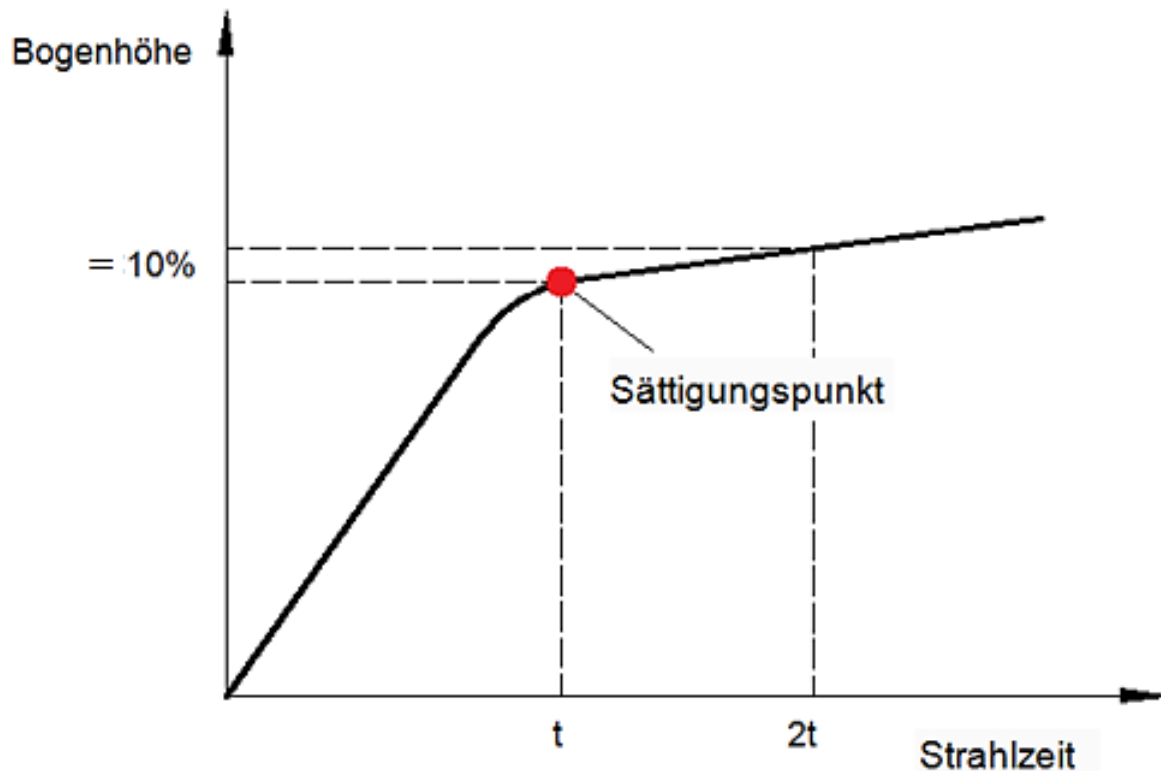


Abbildung 16: Sättigungskurve zur Intensitätsermittlung

In dieser Arbeit wurden nur Almenwerte im Bereich des A-Streifens gemessen. Zur Erstellung einer Sättigungskurve wurden jeweils 5 neue Almenstreifen mit einzeln 3, 6, 12, 24 und 48 Sekunden und dem jeweiligen Strahlmittel, Düsenabstand und Einstrahlwinkel überstrahlt. Die sich ergebende Bogenhöhe wurde auf einer Almen-Messuhr gemessen und in eine Curve-Solver Software der Firma Shockform (Abbildung 17) übertragen, welche eine automatische Berechnung des Sättigungspunktes und damit der Strahlintensität durchführt.

In Abhängigkeit von dem Ergebnis muss ggfs. eine iterative Korrektur des Luftdrucks zur Erreichung der gewünschten Strahlintensität durchgeführt werden.

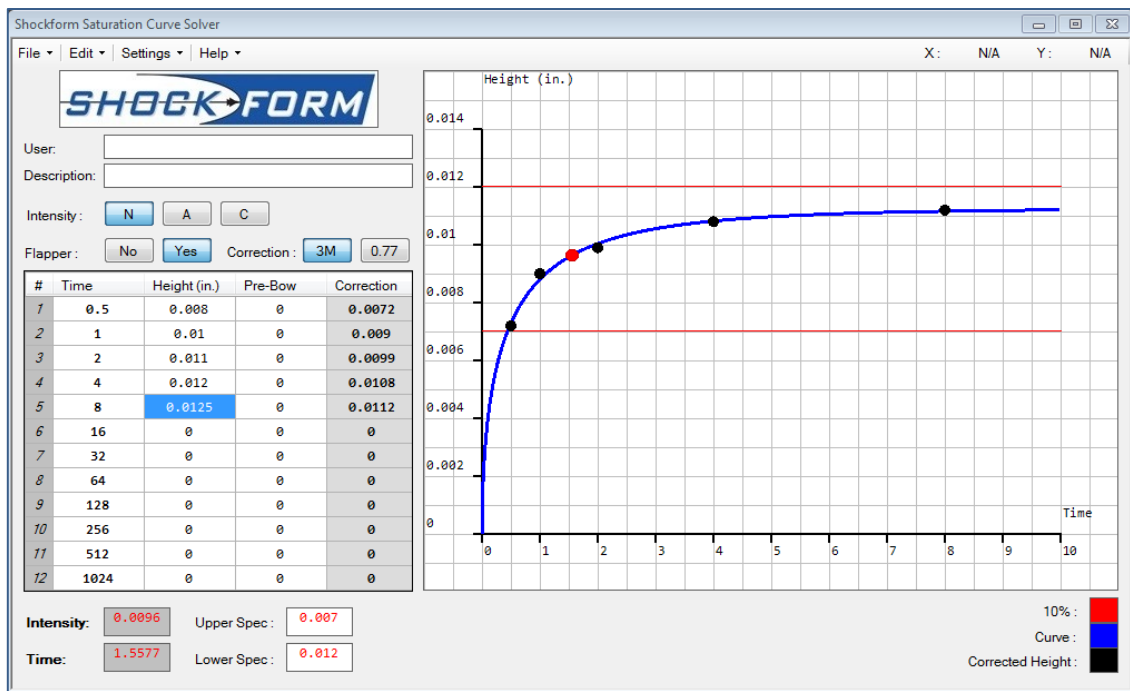


Abbildung 17: Beispiel einer Sättigungskurve erzeugt mittels Saturation Curve Solver Software (Firma Shockform)

Dabei muss beachtet werden, dass die jeweilige Durchbiegung des Almenstreifens die Folge mehrerer Einflussgrößen ist. Hierbei fließen die Art der Strahlanlage (Düsen-, Schleuderradstrahlanlage), Geschwindigkeit, Durchmesser und Härte des verwendeten Strahlmittles als auch der Überdeckungsgrad in die resultierende Durchbiegung des Almenstreifens ein (Abbildung 18) [70]:

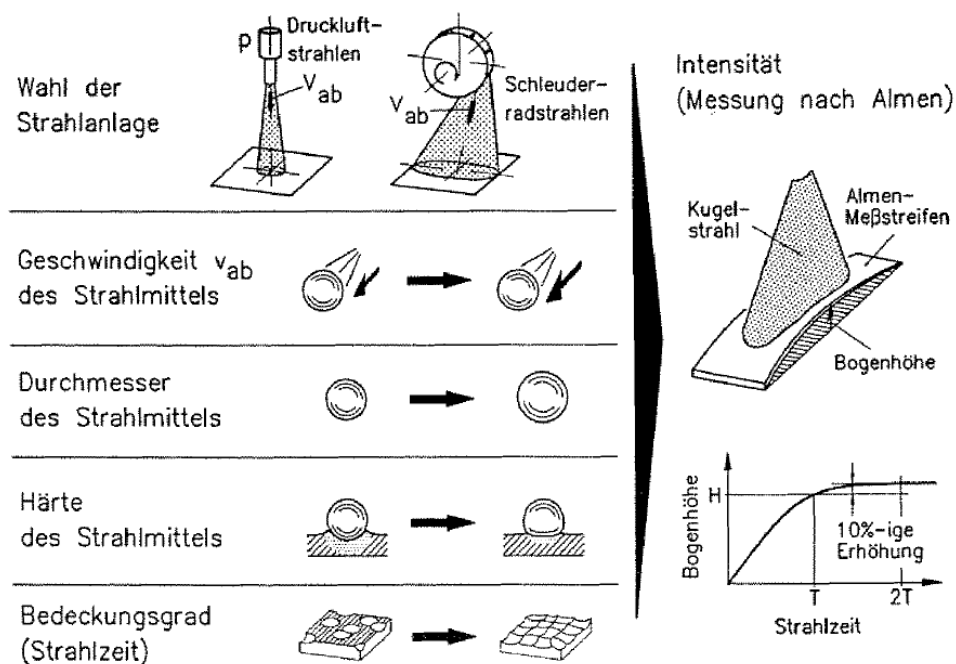


Abbildung 18: Variationsparameter beim Verfestigungsstrahlen und Definition der Intensität [70]

Erwähnenswert ist hierbei, dass dieselbe Durchbiegung des Almenstreifens mit durchaus unterschiedlichen Parameterkombinationen erreicht werden kann. Die gemäß Almenwert eventuell gleichen Intensitätswerte haben aber im seltensten Fall die gleiche Druckeigenspannungsverteilung im Werkstück zur Folge. Von daher ist es für einen reproduzierbaren Kugelstrahlprozess von entscheidender Bedeutung alle relevanten (Tabelle 5) Strahlparameter festzuschreiben und zu überwachen.

Tabelle 5: Einflussgrößen auf das Verfestigungsstrahlergebnis [61] [66]

Anlagentechnik	Strahlmittel	Werkstück
Strahlmittelgeschwindigkeit	Form	Geometrie
Einstrahlwinkel	Härte	Elastisch-plastisches
Strahlmitteldurchfluss	Masse	Verformungsverhalten
Strahlzeit/Überdeckungsgrad	Größe/Verteilung	Härte
Strahldüse (l, d)	chem. Zusammensetzung	chem. Zusammensetzung
Düsenabstand	Verschleißzustand°	Temperatur
Düsen-/Werkstück Beweg.		Spannungen
Vorrichtung		Überdeckungsgrad

6.2.4. Einfluss des Einstrahlwinkels auf die Almenintensität und die Werkstückoberfläche

Einer der beiden Hauptaugenmerke dieser Arbeit war es den Effekt unterschiedlicher Einstrahlwinkel auf die Ermüdungslebensdauer von Ti-6Al-4V zu untersuchen. Dabei war es wichtig mit den untersuchten Strahlparametern innerhalb der in den allgemeinen oder herstelllerspezifischen Spezifikationen genannten Vorgaben zu bleiben.

In der Literatur finden sich verschiedene Untersuchungen zu den Auswirkungen von zu 90° abweichender Einstrahlwinkel auf verschiedenen Werkstoffen [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] in Hinsicht auf die resultierende Lebensdauer, Rauigkeit, Abtrag oder induzierte Druckeigenspannung. Gemein ist nahezu all diesen Untersuchungen aber, dass hierbei mit konstanter Abwurfgeschwindigkeit gestrahlt wurde. Das heißt, dass entweder der einmal unter 90° Einstrahlwinkel ermittelte Luftdruck bei Düsenstrahlanlagen oder die Drehzahl des Schleuderrades bei

Schleuderradanlagen unverändert für alle untersuchten Einstrahlwinkel zur Anwendung kam. Diese Tatsache hat zur Folge, dass bei immer kleineren Aufprallwinkeln der Anteil, der parallel zur Werkstückoberfläche orientierten Komponente des Geschwindigkeitsvektors einer Kugel immer grösser wird. Die senkrecht zur Werkstückoberfläche wirksame kinetische Energie wird hingegen immer kleiner (Abbildung 19) [79].

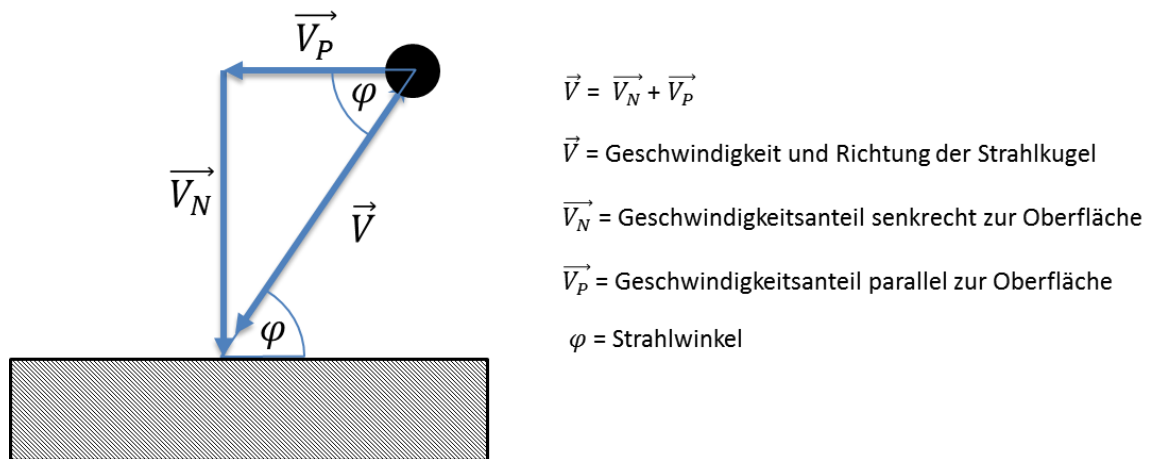


Abbildung 19: Aufteilung der Strahlmittelgeschwindigkeit in senkrechte und parallele Kräfte in Bezug zur Oberfläche

Als Folge dieser von der Senkrechten abweichenden Kugelaufschläge auf die Werkstückoberfläche werden die Kugelabdrücke mit zunehmendem kleinerem Auftreffwinkel immer flacher und bilden sich zusätzlich nicht mehr rund sondern elliptisch aus (Abbildung 20).

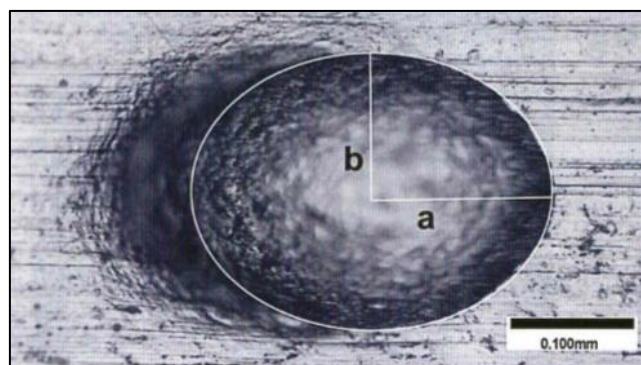


Abbildung 20: Elliptisch geformter Kugelabdruck von ASR170 Strahlmittel [79]

Insbesondere die zunehmend geringere Tiefe der Kugelabdrücke bei gleicher Strahlmittelgeschwindigkeit unter flachem Einstrahlwinkel hat auch eine abnehmende

Durchbiegung des Almenstreifens zur Folge. Anhand der Abbildung 21 kann man erkennen, dass z.B. bei 30° Einstrahlwinkel nur noch etwa 40% der Durchbiegung wie bei 90° Einstrahlwinkel erreicht werden. Die Punkte stellen hierbei die tatsächlich gemessenen Werte dar.

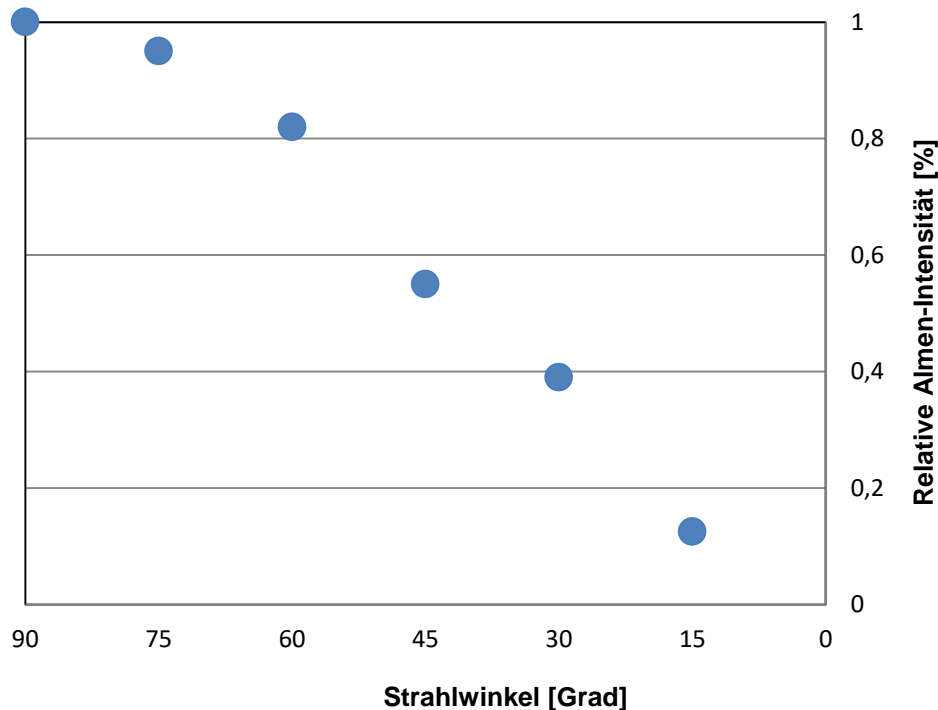
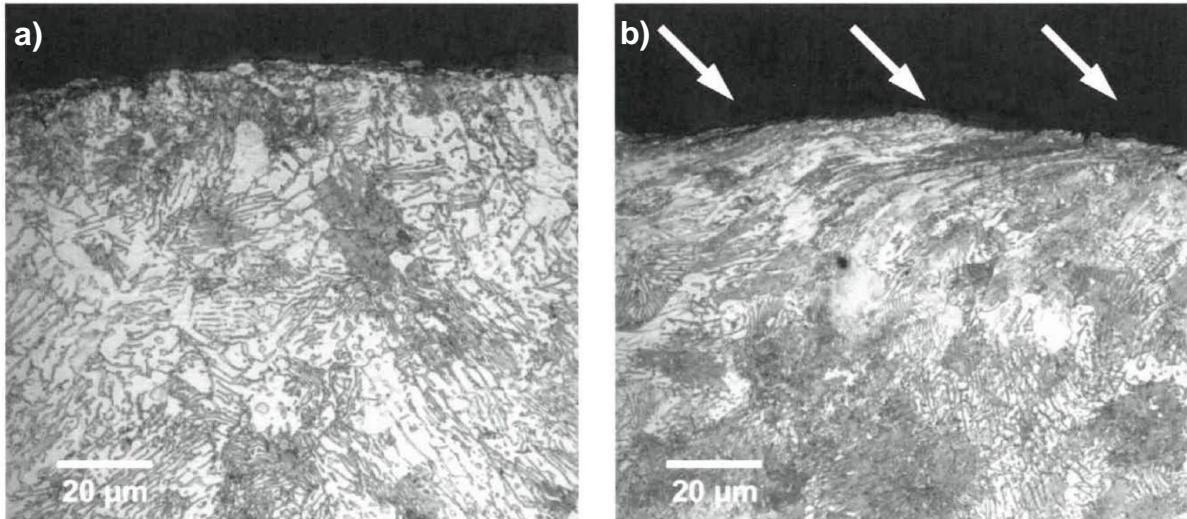


Abbildung 21: Einfluss des Einstrahlwinkels auf die relative Strahlintensität in Almen

Diesem Effekt wird beim industriellen Strahlen von Bauteilen bei denen ein Einstrahlwinkel abweichend von 90° gefahren werden muss Rechnung getragen indem man beim Einrichten der Strahlanlage zunächst an den entsprechenden Stellen Almenstreifen unter den die tatsächliche Oberfläche repräsentierenden Winkeln und Abständen zur Düse strahlt. Zur Erreichung der geforderten Strahlintensität muss dann in aller Regel die Strahlmittelgeschwindigkeit mittels Druckanpassung nachreguliert werden.

Ein weiterer mit zunehmend flacherem Einstrahlwinkel einhergehender Effekt ist eine der Aufprallrichtung und -winkel nach ausgerichtete Deformierung der oberflächennahen Gefügebereiche welche mit dem parallel zur Werkstückoberfläche ansteigenden Geschwindigkeitsanteil V_p einhergeht. Diese Folgen einer gerichteten plastischen Deformation lassen sich Werkstoff- und Strahlparameterabhängig zum

einen im Schliffbild (Abbildung 22) als auch in einer sich mit zunehmender Strahlzeit/Überdeckung stärker ausbildenden Welligkeit der Oberfläche (Abbildung 23) erkennen.



**Abbildung 22: Metallographische Querschliffpreparation und Lichtmikroskopie eines Stahls (C80) im normalisierten Zustand mit perlitischem Gefüge;
(a) nicht gestrahlte Oberfläche (b) unter 45° Einstrahlwinkel verfestigungsgestrahlte Oberfläche [80]**

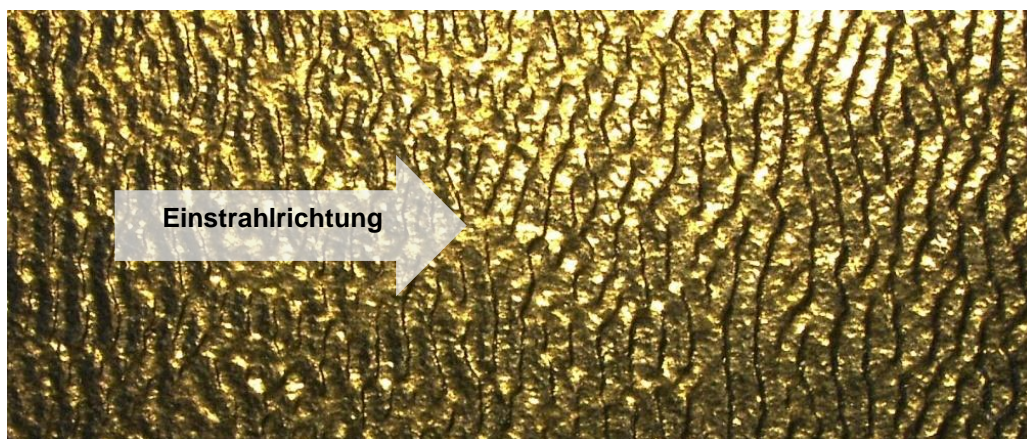


Abbildung 23: Oberfläche eines unter 45° Einstrahlwinkel mit ASR110 verfestigungsgestrahltem Almenstreifens mit einer Strahlzeit von 40 s und einem Druck von 7,5 bar

7. Material und Methoden

7.1. Versuchswerkstoff

Bei dem in dieser Arbeit für alle durchgeführten Versuche verwendeten Material handelt es sich um den Werkstoff Ti-6Al-4V der häufig auch als Titan Grade 5 bezeichnet wird und die Werkstoffnummer 3.7165 trägt. Das Material wurde von der Fa. Tennant aus einer Schmelze (17EY) als Stangenmaterial mit einem Durchmesser von $\varnothing 12,7$ mm angeliefert. Das Material erfüllt weiterhin die Luftfahrtnorm AMS4928 [81] und die Spezifikationen ASME B 348 [82] und UNS R56400. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Kennwerte wurden zum einen per Materialzeugnis bei der Lieferung dokumentiert und zusätzlich im Prüflabor der TU Clausthal geprüft (Tabelle 6 und Tabelle 7).

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung

Element	Al	Cu	Fe	Mo	Ni	Si	Sn	V	Zr	Ti
wt. %	6.68	<0.005	0.1581	<0.01	0.0115	0.0115	<0.01	4.114	<0.003	89.0

Tabelle 7: Festigkeitskennndaten

Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	E [GPa]
990	1035	17.4	101

Mikrographische Untersuchungen zeigen eine für diese Art von ($\alpha + \beta$)-Titan typisch globular ausgebildete Mikrostruktur ohne sichtbare Textur (Abbildung 24).

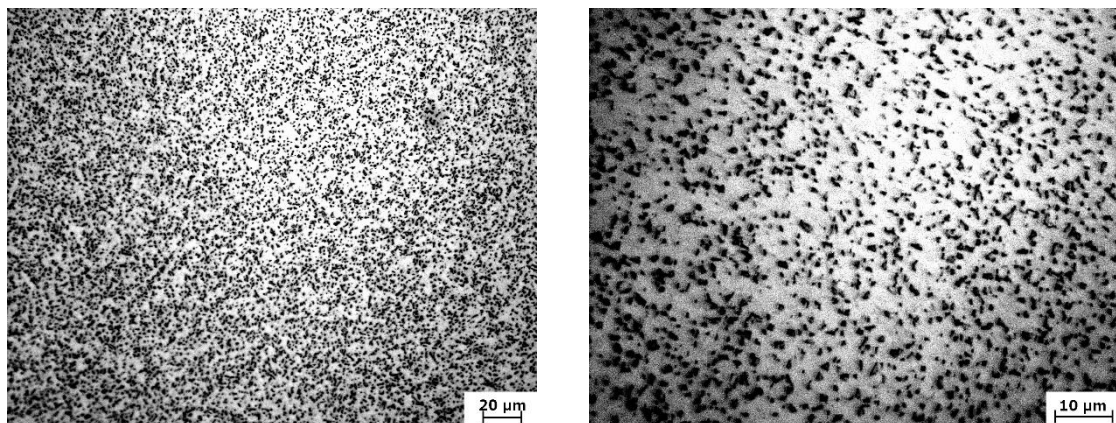


Abbildung 24: Mikrographie der globularen Struktur des für den ersten Teil der Untersuchungen verwendeten Ti-6Al-4V

Gegen Ende der gesamten Testreihen der Überdeckungsgradversuche wurde vom gleichen Hersteller und gemäß Prüfzeugnis aus der gleichen Schmelze nochmals Material bestellt um weitere nachträglich verifizierende Umlaufbiegeproben für die Versuche mit 1200 % Überdeckung zu erhalten.

Dabei stellte sich heraus, dass die ermittelten Dauerfestigkeiten zwar ähnliche Tendenzen aber nicht das gleiche Niveau der zuvor ermittelten Werte aufzeigten. Eine erneute Überprüfung der Festigkeitskenndaten ergab keine signifikante Abweichung zu den in Tabelle 6 und Tabelle 7 ermittelten Werte.

Bei der Mikrographie jedoch stellte sich eine durchaus veränderte Verteilung der α - und β Phasen dar, welche zudem eine leicht veränderte Textur aufwiesen (Abbildung 25).

Während bei der ursprünglichen Materiallieferung eine durchgängig globulare Mikrostruktur erkennbar ist (Abbildung 25 (a)) zeigte die nachgelieferte Probe (Abbildung 25 (b)) Tendenzen in Richtung einer mehr lamellaren Ausprägung.

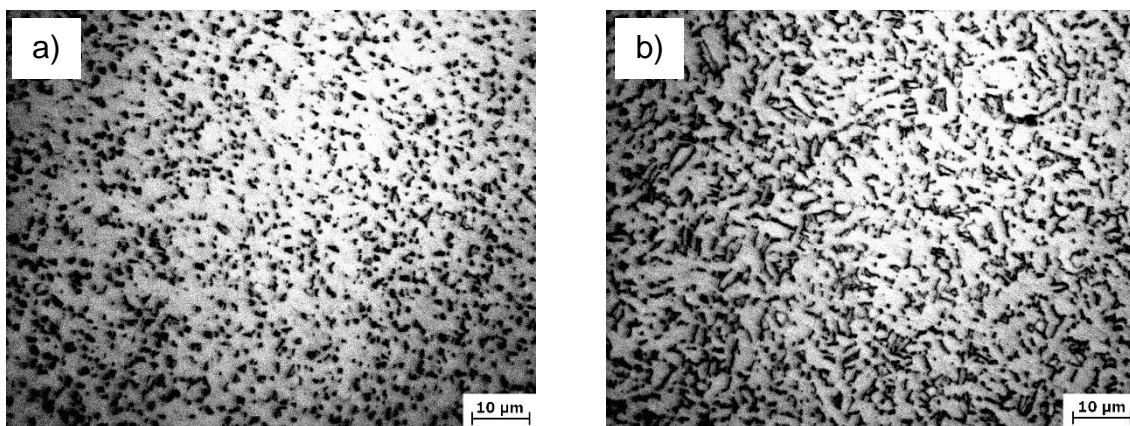


Abbildung 25: Mikrographie des ursprünglichen (a) und nachgelieferten (b) Ti-6Al-4V, für die mit 1200 % Deckung verwendeten Umlaufbiegeproben

In Kapitel 5.1 wurde bereits ausgeführt, dass die Mikrostruktur und kristallografische Textur Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer nehmen. Tendenziell wurde festgestellt, dass feinere globulare Strukturen mit kleineren α -Korngrößen höhere Dauerfestigkeiten aufweisen als gröbere lamellare Strukturen. Diese Annahme wurde auch in diesem Fall insofern bestätigt, als dass die nachträglich angefertigten Proben mit dem nachgelieferten Material generell ein niedrigeres Dauerfestigkeitsniveau aufwiesen. Vor diesem Hintergrund werden diese Proben auch separat betrachtet und nur unter Vorbehalt in Bezug zu den aus dem Ursprungsmaterial hergestellten Umlaufbiegeproben mit 20 % und 100 % Deckung gesetzt.

7.2. Kugelstrahlanlage

Die Kugelstrahlarbeiten wurden auf einer Druckluftstrahlanlage Modell 1001 (Hersteller: OSK Kiefer GmbH) im Kugelstrahllabor der TU Clausthal durchgeführt.

7.3. Strahlmittel

Als Strahlmittel kam das aus Drahtkorn bestehende SSCW14 und die beiden ähnlich großen Gussstrahlmittel ASR110 und ASH110 zum Einsatz. Die chemische Zusammensetzung, der Durchmesser, Härte und Dichte sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Verwendete Strahlmittel

Strahlmittel	Chemische Zusammensetzung [wt.%]	Durchm. [mm]	Härte [HV0.3]	Dichte [g/cm ³]
SSCW14	0.57 C, 0.67 Mn, 0.22 Si; P, S ≤ 0.25	0.35	675	7.8
ASR110	1.02 C, 0.5 Mn, 0.41 Si; P, S ≤ 0.03	0.3	500	7.5
ASH110	1.09 C, 0.48 Mn, 0.51 Si; P, S ≤ 0.025	0.3	652	7.5

Die mikroskopischen Aufnahmen (200x) in Abbildung 26 zeigen, dass die Rundheit der Strahlmittel aus Gusseisen ASR110 und ASH110 deutlich ausgeprägter als bei dem Drahtkorn SSCW14 ist. Dieser Unterschied liegt in den unterschiedlichen Herstellungsverfahren der Strahlmittelsorten begründet.

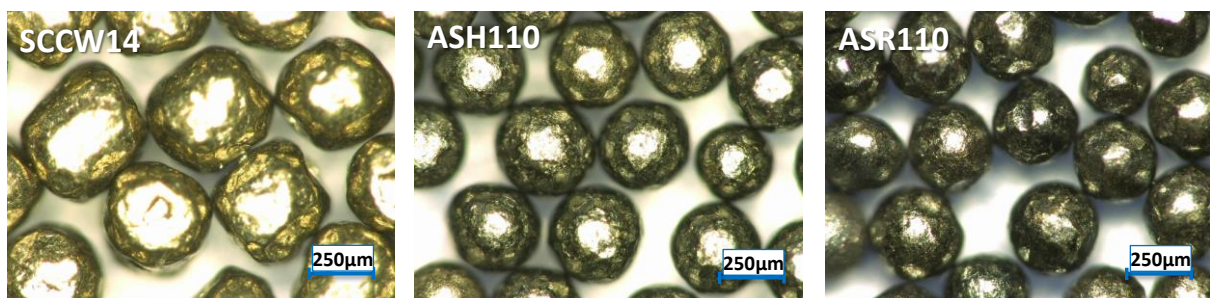


Abbildung 26: Vergrößerung (200x) der Strahlmittel (a) SCCW14 (b) ASR110 (c) ASH110

Während bei den Untersuchungen zum Überdeckungsgradeinfluss alle drei Strahlmittelsorten eingesetzt wurden, hat man sich im Zuge der Einstrahlwinkeluntersuchungen auf das Strahlmittel ASR110 beschränkt.

Alle drei eingesetzten Strahlmittel- und Größen entsprechen den üblichen Spezifikationen zum Verfestigungsstrahlen von z.B. Luftfahrtteilen und werden hier auch häufig verwendet.

7.4. Rauigkeitsmessungen

7.4.1. Gemessene Rauigkeiten

Die Oberflächenrauheit der Proben wurde durch Tastschnittverfahren mittels eines Vorschubmessgeräts vom Typ MAHR Perthometer S8P ermittelt.

Dabei fährt ein Taster (Typ RFHTB-250) mit Diamantspitze senkrecht zur Rillenrichtung über die Oberfläche des Werkstücks und der senkrechte Hub der Tastspitze wird in ein elektrisches Signal umgesetzt. Die Messsignale des Primärprofils werden direkt mit Hilfe eines analog/digital Wandlers in ein Auswertegerät eingelesen. Dort erfolgen durch digitale Filterung die Bestimmung des Welligkeit- und des Rauheitsprofils sowie die Berechnung der Kenngrößen.

Die Messlänge in dieser Arbeit ist 1.75 mm und wurde in 7 Teile geteilt d.h. jedes Intervall ist 0.25 mm lang. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Ergebnisse der ersten und letzten Teile gelöscht, weil die Tastgeschwindigkeit sich in der ersten Phase beschleunigt und in der letzten Phase verzögert.

Bei den Untersuchungen an den Umlaufbiegeproben wurde jede Probe 1 Mal gemessen während bei den Wechselbiegeproben jede Probe 3 Mal vermessen wurde. Die maximale Rauheitstiefe R_{\max} , sowie der arithmetische Rauheitsmittelwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z wurden als Parameter gespeichert.

Der arithmetische Mittenrauwert R_a (Abbildung 27) ist das arithmetische Mittel der Beträge der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils innerhalb der Einzelmessstrecke l_r . Er stellt die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie dar.

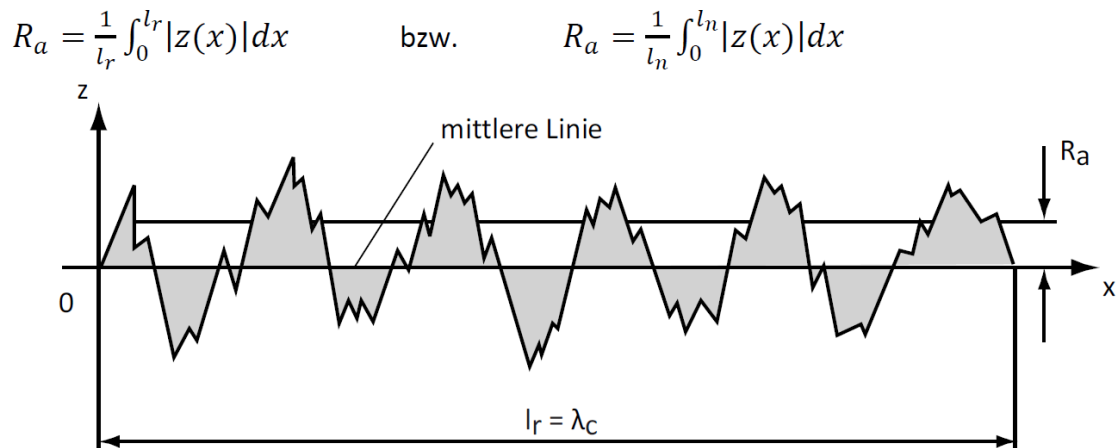


Abbildung 27: Bildung des arithmetischen Mittenrauwert R_a [83]

Die gemittelte Rautiefe R_z ist die Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals innerhalb einer Einzelmessstrecke l_r . Üblicherweise ergibt sich R_z aus Mittelung der Ergebnisse von 5 Einzelmessstrecken. Insgesamt reagiert R_z empfindlicher auf die Veränderung von Oberflächenstrukturen als R_a .

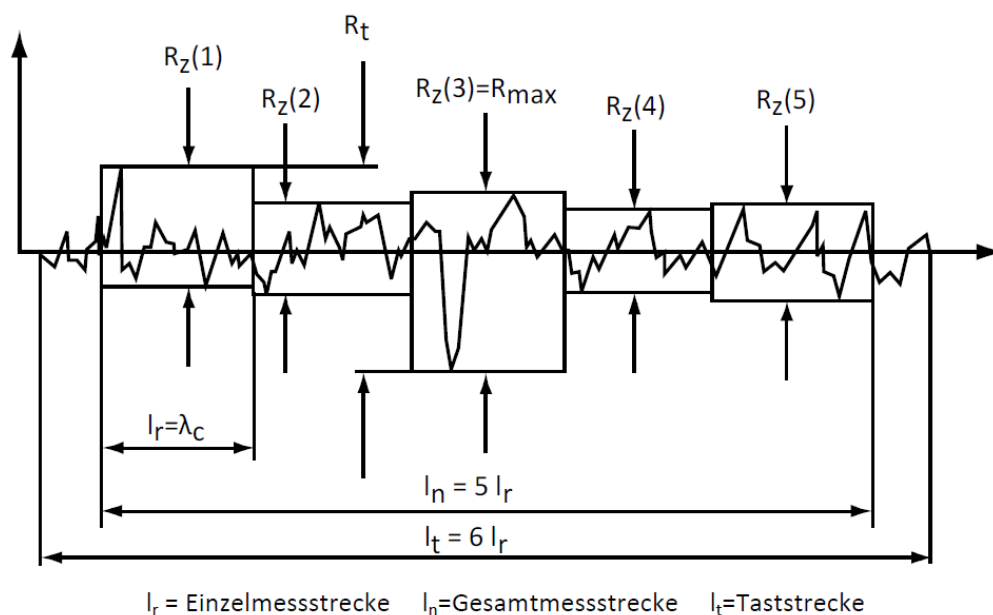


Abbildung 28: Definition der Rautiefe R_z , der maximalen Einzelrautiefe R_{max} und der Rautiefe R_t [83]

Die maximale Einzelrautiefe R_{max} entspricht dabei der größten Einzelrautiefe R_z . Die Rautiefe R_t ist die vertikale Differenz der tiefsten Riefe und der höchsten Spitze innerhalb der Gesamtmessstrecke. [83]

7.4.2. Welligkeit

Insbesondere die unter verschiedenen Einstrahlwinkeln gestrahlten Wechselbiegeproben machte die Beurteilung der Oberflächen nicht nur in Bezug auf deren Rauigkeitskennwerte sondern auch der sogenannten Welligkeit notwendig.

Die im Folgenden beschriebene Welligkeit wurde ebenfalls durch das Tastspitzverfahren ermittelt.

Die Wellentiefe W_t ist hierbei die Summe aus der Höhe der größten Wellenspitze und der Tiefe des Wellentals innerhalb der Messlänge des gefilterten Profils nachdem die Rauheit ausgefiltert wurde [83].

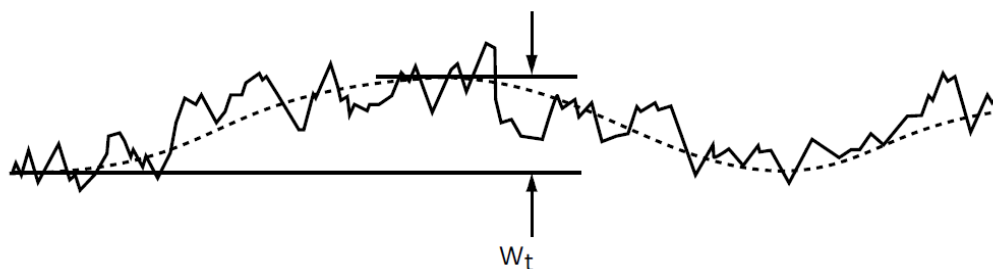


Abbildung 29: Ableitung der Wellentiefe W_t [83]

7.5. Eigenspannungsmessungen mittels Bohrlochverfahren

Zur Ermittlung der das Ermüdungsverhalten wesentlich beeinflussenden Eigenspannungen wurde bei allen Versuchen die Bohrlochmethode verwendet (Abbildung 30). Mit dieser Methode lassen sich zerstörend die makroskopischen Oberflächendehnungen messen und hierüber die Eigenspannungen der I Art – das heißt über mehrere Körner gemittelt - ermitteln.

Die Bohrlochmethode misst die Oberflächendehnungen, indem man in ein Bauteil kontrolliert ein Sackloch an der zu untersuchenden Stelle einbringt. Das Entfernen der Eigenspannungen in diesem Volumen erzwingt eine Umverteilung der verbleibenden Eigenspannungen, was dazu führt, dass sich die Oberfläche um das Loch herum verzerrt und diese makroskopischen Oberflächendehnungen gemessen werden.

Wegen des Anbohrers der Werkstückoberfläche zählt die Bohrlochmethode zu den zerstörenden Eigenspannungsmessmethoden.

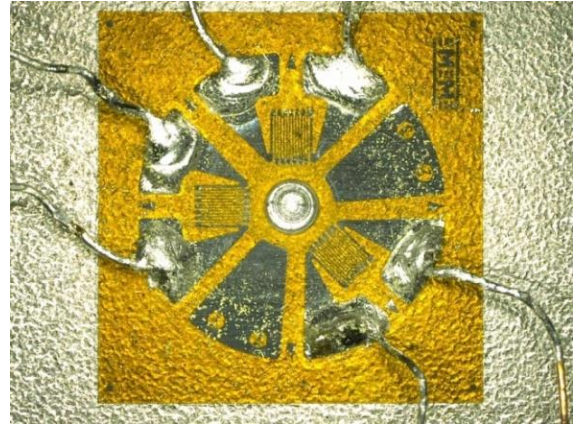
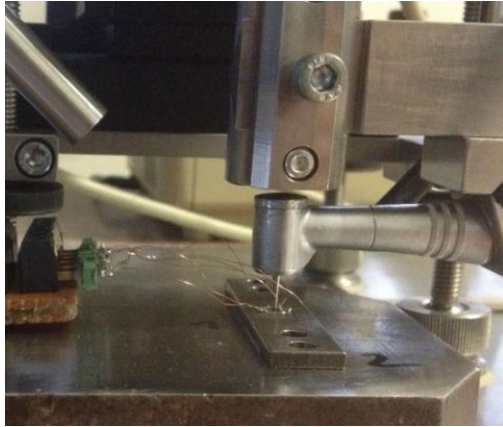


Abbildung 30: Bohrlochmethode (a) Bohrvorgang (b) Dehnmessstreifen (DMS)

Hierzu wird vor dem eigentlichen Bohrvorgang eine Dehnmessrosette (DMS) (Abbildung 30(b)) auf den zu messenden Bereich der Probe angebracht. Durch diese DMS welche es in verschiedenen Größen und Ausführungen gibt werden Veränderungen der Probenoberfläche gemessen, die auf das Heraustrennen des Lochvolumens zurückzuführen sind, d.h. auch auf das Entfernen eines Teils der z.B. durch das Verfestigungsstrahlen eingebrachten Eigenspannungen im Bauteil [84]. Über materialspezifische Kalibrierdaten lässt sich dann der vor dem Anbohren vorhandene Eigenspannungszustand berechnen.

8. Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen des Einflusses des Überdeckungsgrades und des Einstrahlwinkels mit spezifizierten Strahlmitteltypen auf die Ermüdungsfestigkeit von Ti-6Al-4V wurden sowohl

- Umlaufbiegeproben: Untersuchungen mittels unterschiedlicher Überdeckungsgrade und Strahlmitteltypen und
- Wechselbiegeproben: Untersuchungen mittels unterschiedlicher Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrade

verwendet.

Sowohl die Umlaufbiegeproben als auch die Wechselbiegeproben wurden aus demselben Rundmaterial eines Ti-6Al-4V mit einem Durchmesser von 12,7 mm hergestellt.

Die Wechselbiegeproben als auch die Umlaufbiegeproben mit 20 % und 100 % Überdeckungsgrad wurden dabei aus derselben Gusscharge des Ti-6Al-4V gefertigt. Einzige Ausnahme bildeten die Versuche an den Umlaufbiegeproben mit jeweils 1200 % Überdeckung, welche an einer Nachlieferung der Ti-6Al-4V Legierung mit leicht unterschiedlicher Mikrographie durchgeführt wurden (siehe 7.1).

Bei der drehenden und fräsenden Bearbeitung wurde darauf geachtet, die z.T. spezifizierten [6] [85] Rauigkeitswerte von $< R_a \ 1,6 \ \mu\text{m}$ nach der Vorbearbeitung nicht zu überschreiten und somit eine industriell typische Oberfläche für Bauteile aus Ti-6Al-4V vor der Verfestigungsstrahlbehandlung bereitzustellen.

Als Referenzproben wurden für die Umlaufbiegeversuche elektropolierte und somit im Oberflächenbereich eigenspannungsfreie Proben herangezogen. Diese Proben werden im Folgenden als EP für elektropoliert bezeichnet.

Als Referenzprobe für die Einstrahlwinkelversuche mittels Wechselbiegeproben wurde eine mechanisch polierte Referenz (Bezeichnung MP) herangezogen.

8.1. Versuche mit unterschiedlichen Überdeckungsgrad und Strahlmitteltypen

8.1.1. Verwendete Umlaufbiegeproben

Zur Ermittlung der Effekte der Überdeckungsgrade von 20, 100 und 1200 % wurden aus dem Rundmaterial sanduhrförmige Umlaufbiegeproben mit einem minimalen Durchmesser von 6 mm, einem Außendurchmesser von 10 mm und einer Länge von 55 mm hergestellt (Abbildung 31).

Diese Art der Probengeometrie in gleicher oder ähnlicher Ausführung hat sich bereits bei vielen Untersuchungen zu diesem Werkstoff und der verschiedenen Oberflächenbehandlungen wie u.a. Verfestigungsstrahlen als ideal herausgestellt und stellt somit auch eine gute Vergleichbarkeit mit bereits vorliegenden Ergebnissen sicher.

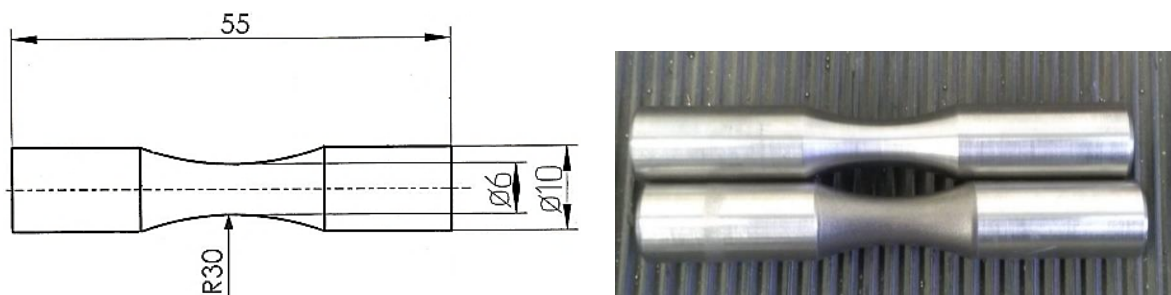


Abbildung 31: (a) Zeichnung Umlaufbiegeprobe (b) Probe vor (oben) und nach (unten) dem Verfestigungsstrahlen

8.1.2. Verfestigungsstrahlbehandlung der Umlaufbiegeproben

8.1.2.1. Verwendete Strahlmitteltypen

Für die Versuche mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden (20 %, 100 %, 1200 %) an den Umlaufbiegeproben kamen die beiden Gussstrahlmittel ASR110 und ASH110 als auch das konditionierte arrondierte Drahtkorn SCCW14 zum Einsatz.

8.1.2.2. Einrichten des Strahlprozesses und der Strahlintensität

Vor der Bearbeitung der Proben wurde die gewünschte Strahlintensität individuell für jedes der drei verwendeten Strahlmittel mittels Überstrahlen von hierfür notwendigen Almenstreifen und den sich daraus ergebenden Sättigungskurven erstellt.

Die einheitlich geforderte und eingestellte Almenintensität war in allen Fällen 0,20 mmA.

Mit den sich hieraus ergebenden Maschineneinstellungen wurden die Ermüdungsproben dann mittels Laserpointer zur Strahldüse ausgerichtet welche sich in einem für alle Variationen konstantem Abstand von 90 mm zur Probenoberfläche befand (Abbildung 32).

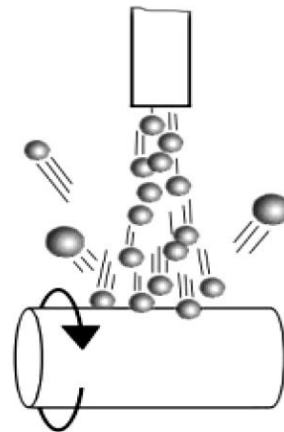


Abbildung 32: (a) Einrichtung der Umlaufbiegeprobe beim Verfestigungsstrahlen (b) Strahlvorgang

Die Probe selber rotierte während der Strahlbehandlung mit konstanter Geschwindigkeit um einen gleichmäßigen Aufbau der Überdeckung über den gesamten Radius zu erzielen.

8.1.2.3. Erzeugung geforderter Überdeckungsgrade

Für die Herstellung der Proben mit 100 % Deckung wurde die Kontrolle gemäß SAE J2277 [5] mittels 10x vergrößernder Lupe durchgeführt.

Die für die Erreichung von 100 % Deckung erforderliche Zeitspanne wurde mit dem Faktor 12 multipliziert um spezifikationsgemäss eine gewünschte Deckung von 1200 % an den geforderten Proben zu generieren.

Die Strahlzeiten für 100 % Deckung betrugen 20 s woraus sich eine Strahlzeit von 240 s für die 1200 % Deckung ergeben.

Für die ebenfalls erforderlichen 20 % Deckung wurde eine Blendenkonstruktion wie in Abbildung 33 gezeigt erstellt.

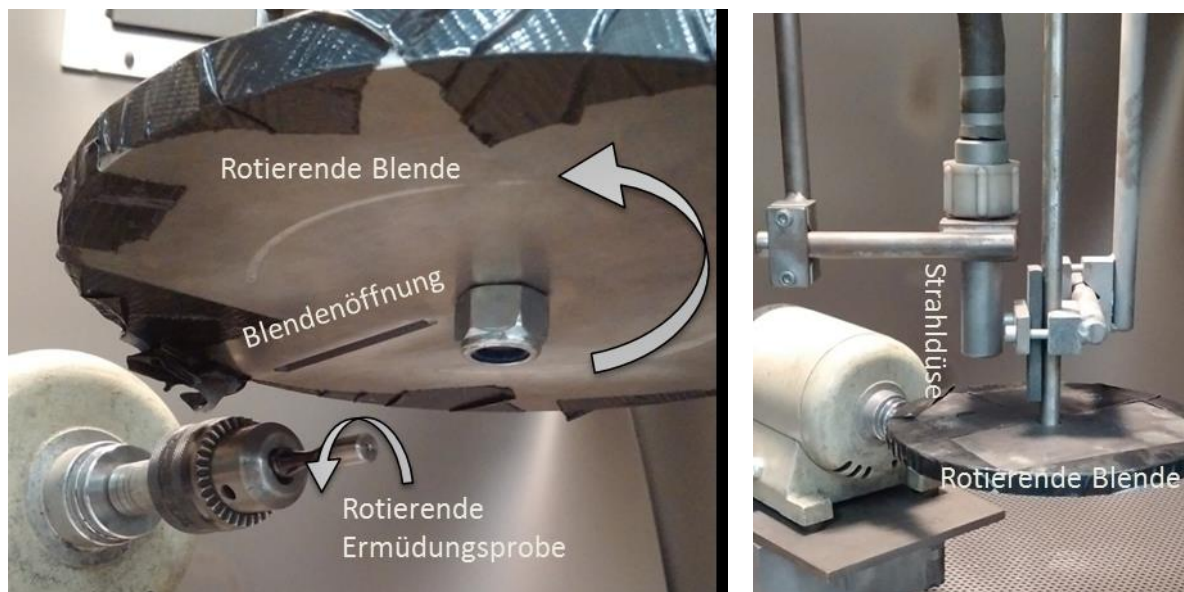


Abbildung 33: Blendenkonstruktion zur Herstellung der Proben mit 20 % Überdeckung

Bei früheren Versuchen mit geringen Überdeckungsgraden bediente man sich der Methode zum einen die Durchflussmenge des Strahlmittels als auch die Strahlzeit zu reduzieren um die gewünschte geringe Deckung zu erzielen [9].

Diese Methode birgt aber die Gefahr von Intensitätsschwankungen, da die variierte Durchflussmenge bei konstantem Luftdruck erfahrungsgemäß unterschiedlich schnell beschleunigt wird. Durch diese bei geringerer Durchflussmenge erhöhte Beschleunigung der verbleibenden Partikel ergibt sich zwangsläufig eine Veränderung der sich hieraus ergebenden Strahlintensität.

In dieser Arbeit wurde daher mittels einer rotierenden, mit einer rechteckigen Öffnung (Abbildung 33 – Blendenöffnung) versehene, Abdeckscheibe bei konstantem Druck und Durchflussmenge nur die Anzahl der Strahlpartikel die während einem oder mehrerer Durchläufe die Probenoberfläche trafen reduziert. Die Scheibe mit der

schlitzartigen Öffnung fungierte hierbei vergleichbar mit einer Schlitzblende bekannt aus z.B. der Fotografie.

Drehgeschwindigkeit der Abdeckscheibe mit der Blendenöffnung und Probe mussten dabei so aufeinander abgestimmt werden, dass es zu einer gewünscht gleichmäßigen Überdeckung über den gesamten Radius der Umlaufbiegeprobe kam.

8.1.2.4. Messung der geforderten Überdeckungsgrade

Die Verifikation der 100 % Deckung erfolgte mittels 10x vergrößernder Lupe.

Zur Feststellung des Überdeckungsgrades von 20 % wurden zunächst photographische Aufnahmen der Probenoberfläche getätigt und die einzelnen Kugelabdrücke manuell markiert. Das sich hieraus ergebende Bild wurde über ein PC basiertes Grafikprogramm in ein schwarz-weiß Muster konvertiert um hieraus mittels einer ebenfalls PC basierten Software die Deckung berechnet. Die Abweichung beträgt hierbei ca. +/-5 %. (Abbildung 34)

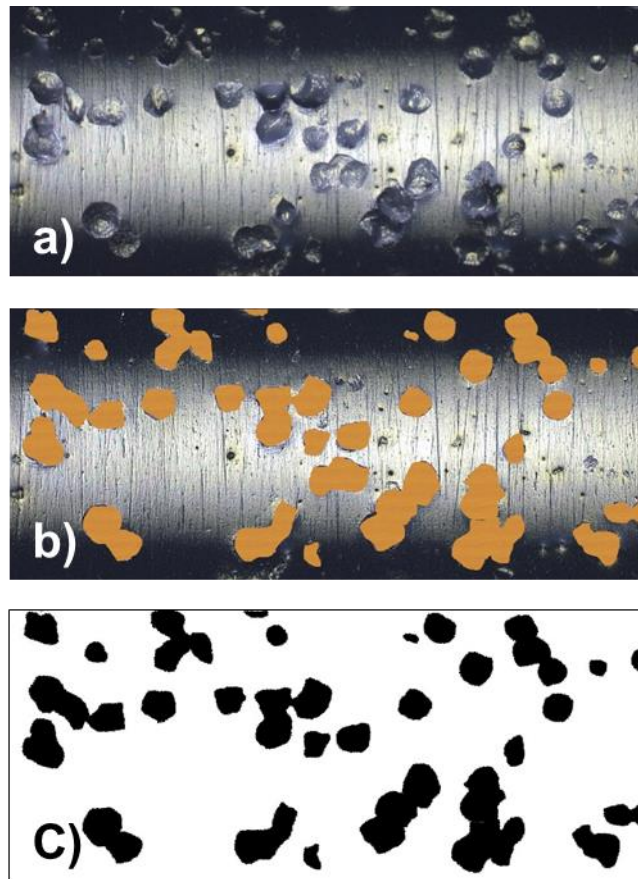


Abbildung 34: Messung Überdeckungsgrad bei 20 %; (a) Foto gestrahlter Oberfläche (b) Markierung der Kugelabdrücke (c) S/W Bild zur Berechnung des Überdeckungsgrades

8.1.3. Umlaufbiegeversuche

Sowohl die verfestigungsgestrahlten als auch die Referenzproben im EP Zustand wurden anschließend auf deren Dauerfestigkeitsverhalten im Umlaufbiegeversuch geprüft.

Die Umlaufbiegeversuche wurden auf einem Umlaufbiegeprüfstand der Fa. SincoTec GmbH durchgeführt. Die Ermittlung des Biegewechselfestigkeitsverhaltens wurde nach DIN 50 113 [86] durchgeführt.

Die Berechnung der Biegespannung erfolgt hierbei mittels folgender Formel

$$\sigma_{\text{soll}} = \frac{M_B}{W} = \frac{G \times 9,81 \times 1000 \times 32}{d^3 \times \pi} = \frac{N}{\text{mm}^2}$$

σ : Biegespannung

M_B : Biegemoment = $G \times 9,81 \times \text{Lastarm [Nm]}$

W: Widerstandsmoment = $d^3 \times \pi \div 32$ [mm²]

G: Belastungsgewicht [kg]

d: Probendurchmesser im Prüfquerschnitt [mm]

8.2. Versuche mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad

8.2.1. Verwendete Wechselbiegeproben

Zur Ermittlung des Wechselbiegeversuchs wurden die in Abbildung 35 ersichtlichen Wechselbiegeproben mit den Abmaßen gemäß Abbildung 36 verwendet.

Die Oberfläche und die kreisbogenförmigen Kanten der Proben wurden auf einer Fräsmaschine hergestellt. Weiterhin wurden die Proben mit jeweils 4 Bohrungen versehen, um diese später in die Wechselbiegemaschine einzuspannen zu können.

Die Kanten der Proben wurden vor der Strahlbehandlung mit einer 0,5-1,0 mm Phase versehen und anschließend mechanisch poliert um einen Aufwurf (auch Bulging genannt) während der Verfestigungsstrahlbehandlung im Kantenbereich zu vermeiden.

Vorversuche an Proben mit scharfen Kanten haben einen Aufwurf von ca. 0,2-0,3 mm durch o.a. Bulging-Effekt gezeigt. Da dieser zu eventuellen Verfälschungen der Dauerfestigkeitsversuche hätte führen können wurden alle untersuchten Proben mit einer entsprechenden Phase vor dem Verfestigungsstrahlen versehen.

Die Seitenflächen wurden ebenfalls verfestigungsgestrahlt.



Abbildung 35: Bild einer unversehrten (oben) und gebrochenen Wechselbiegeprobe (unten)

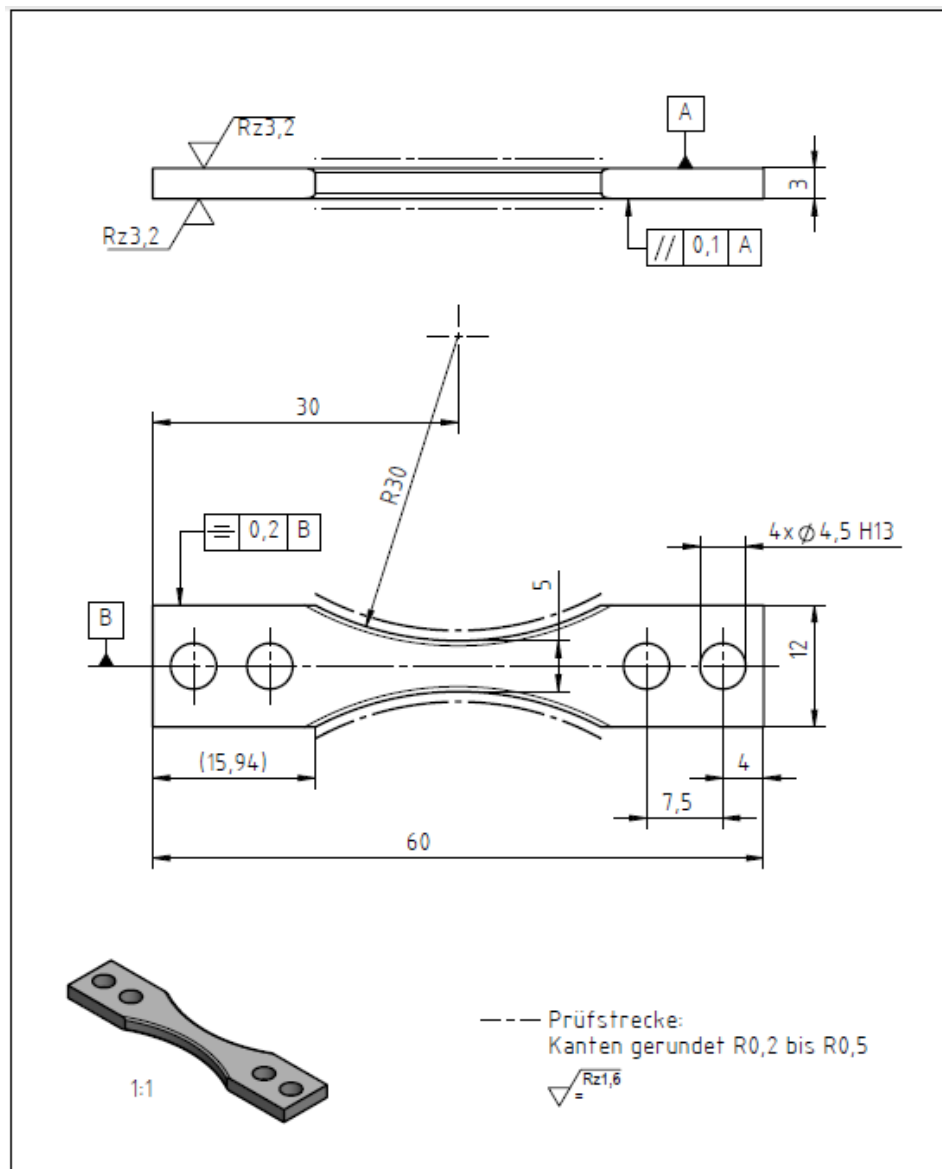


Abbildung 36(b): Abmessungen der Wechselbiegeprobe

8.2.2. Eigenspannungsproben für die Einstrahlwinkeluntersuchung

Die Eigenspannungen wurden auf Proben wie in Abbildung 37 ersichtlich gemessen. Diese Proben unterscheiden sich von den Wechselbiegeproben nur durch das Fehlen der kreisbogenförmigen Ausschnitte, die für die Eigenspannungsermittlung nach dem Verfestigungsstrahlen nicht relevant sind.

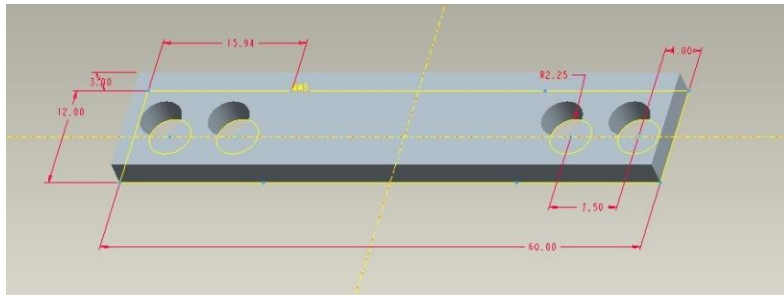


Abbildung 37: Probengeometrie zur Eigenspannungsmessung

8.2.3. Verfestigungsstrahlbehandlung der Wechselbiegeproben

8.2.3.1. Verwendetes Strahlmittel

Für die Untersuchungen des Effektes unterschiedlicher Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrade wurde als einziges Strahlmittel ASR110 verwendet.

8.2.4. Einrichten des Strahlprozesses

8.2.5. Einstrahlwinkel und Düsenabstand

Beim Verfestigungsstrahlen wird der Einstrahlwinkel φ in Grad zwischen der Probenoberfläche und dem Strahlstrom der aus der Strahldüse abgeworfenen Strahlmittels definiert.

Der Düsenabstand S ist der Abstand in mm vom Ausgang der Düsenmitte in direkter Abwurfrihtung des Strahlmittels zur Oberfläche des Werkstücks (Abbildung 38(a)).

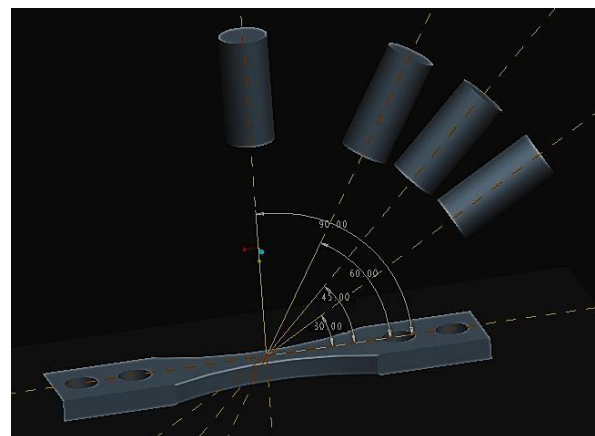
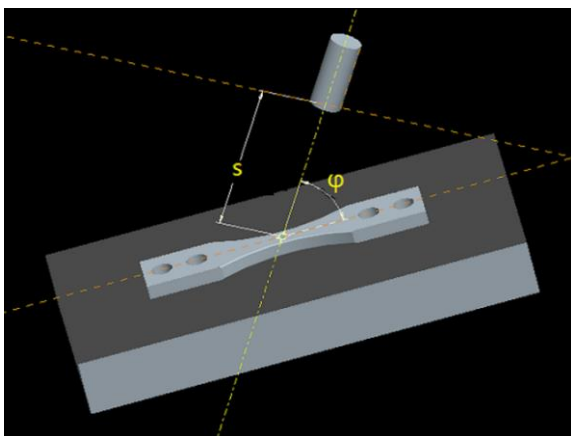


Abbildung 38: (a) Einstrahlwinkel φ und Düsenabstand S (b) Einstrahlwinkel 90°, 60°, 45°, 30° [64]

Abbildung 38(b) zeigt die vier unterschiedlichen Einstrahlwinkel von 90°, 60°, 45° und 30° bei welchen die Wechselbiegeproben gestrahlt wurden.

8.2.6. Konstruktion Probenmanipulator

Die für die Versuche mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln verwendete Strahlanlage verfügt nur über eine frei fixierbare aber während dem Strahlvorgang nicht kontrolliert verfahrbare Düse.

Um ein gleichmäßiges Überstrahlen der Wechselbiegeproben mit konstantem Abstand zur Düse zu bewerkstelligen wurde der in Abbildung 39 ersichtliche batteriebetriebene Probenmanipulator konstruiert und verwendet.

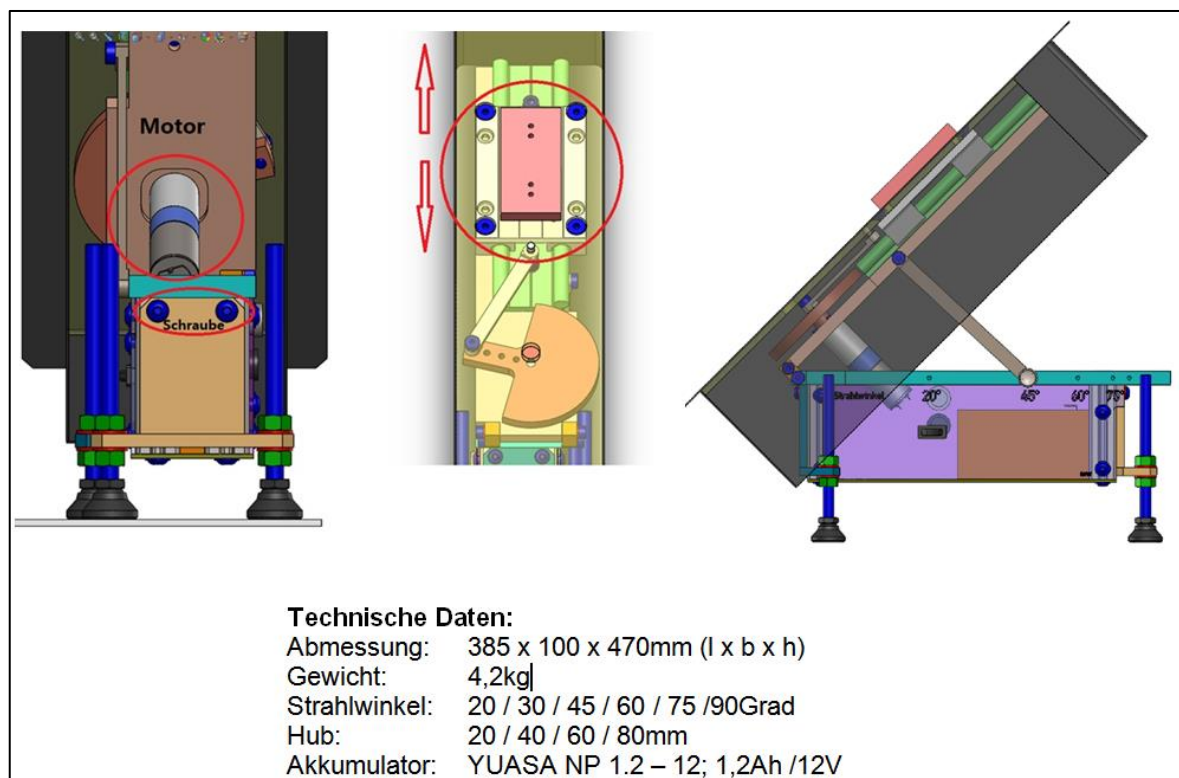


Abbildung 39: Batteriebetriebener Probenmanipulator für die Einstrahlwinkelversuche [64]

Der gewünschte Einstrahlwinkel lässt sich hierbei durch vorgegebene Rasten exakt einstellen. Der batteriebetriebene Motor treibt einen Schlitten an auf dem sowohl die Halterung für die Almenstreifen als auch die Ermüdungsproben befestigt werden können.

8.2.7. Durchführung der Verfestigungsstrahlbehandlung

Nach der Bestimmung und Einstellung der Almenintensität werden die Proben beidseitig mit entsprechenden Bedingungen gestrahlt. Mittels eines Laserpointer wurden sowohl die Almenstreifen als auch später die Ermüdungsproben zur Düse ausgerichtet. Beim Vorgang der Verfestigungsstrahlbehandlung wird der restliche Bereich der Vorrichtung mittels energieabsorbierenden Abdeckungen aus einem gummiartigem Material (Abbildung 40) geschützt.

8.2.8. Ermittlung Strahlzeit/Überdeckungsgrad

Für das in diesem Teil der Arbeit verwendete Strahlmittel ASR110 wurde eine Strahlzeit von 5 s für die Erreichung eines Überdeckungsgrades von 100 % ermittelt. Hieraus ergibt sich spezifikationsgemäss, dass bei einer Strahlzeit von 60 s eine Überdeckung von 1200 % erzielt wird.

8.2.9. Ermittlung Strahlintensität/Strahldruck

Wesentlicher Faktor bei der Ermittlung der Effekte beim Strahlen mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln war die Vorgabe einer Strahlintensität von 0,20 mmA über alle Winkel hinweg.

Wie bereits in Kapitel 6.2.4 dargestellt nimmt die mittels Almenstreifen und zugehöriger Sättigungskurve ermittelte Strahlintensität bei konstanter kinetischer Energie der einzelnen Strahlpartikel mit flacher werdendem Einstrahlwinkels ab. Um diesen Effekt entgegen zu treten wurde bei den vorliegenden Versuchen nur der Strahldruck variiert.

Der Strahlmittelstrom und alle anderen Parameter wie Abstand, Düsenlänge oder Durchmesser blieben bis auf die Variante unter 30° Einstrahlwinkel unverändert.

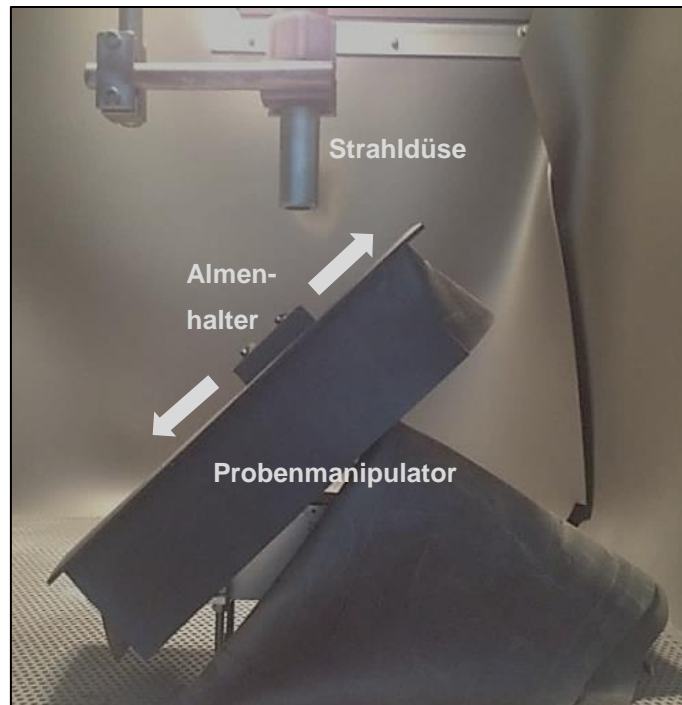


Abbildung 40: Kugelstrahlvorgang mit 45° Einstrahlwinkel

zeigt eine Übersicht der Parameter Druck, Abstand und Strahlzeit für die vier verschiedenen Einstrahlwinkel.

Tabelle 9: Kugelstrahlparameter bei verschiedenen Einstrahlwinkeln

Einstrahlwinkel	[Grad]	90	60	45	30
Strahlintensität	[mmA]	0,20	0,20	0,20	0,16
Druck	[bar]	3	4,7	6,7	7,5*
Abstand (Düse – Oberfläche)	[mm]	90	90	90	15
Strahlzeit 100 %	[s]	5			
Strahlzeit 1200 %	[s]	60			

* anlagentechnisch maximal verfügbarer Druck

Auffällig ist dabei der von 90 mm auf 15 mm reduzierte Abstand der Düse zur Probenoberfläche und die auf 0,16 mmA reduzierte Strahlintensität bei einem Einstrahlwinkel von 30°.

Hintergrund ist die im Kapitel 6.2.4 näher ausgeführte Problematik der senkrecht zur Oberfläche wirkenden abnehmenden kinetischen Energie der auftreffenden Kugeln in Richtung flacherer Auftreffwinkel. In diesem Fall reichte der anlagentechnisch maximal zur Verfügung stehende Luftdruck (7,5 bar) nicht mehr aus, um auch unter dem flachsten Einstrahlwinkel von 30° die geforderten 0,20 mmA Strahlintensität zu erreichen.

Durch die Reduzierung des Düsenabstandes auf 15 mm wurde versucht diese Abweichung zu noch geringeren Almenwerte als 0,16 mmA weiter zu begrenzen.

8.3. Wechselbiegeversuch

Die Wöhlerkurve wird durch die bei unterschiedlichen Lasten und Zyklen gepulsten Proben im Wechselbiegeversuch bestimmt.

Hierzu wurde eine Wechselbiegemaschine von der Firma CARL SCHENCK Maschinenfabrik GmbH, Typ S 53-KJ verwendet (Abbildung 41).



Abbildung 41: Wechselbiegemaschine Fa. SCHENCK

Zu Beginn der Versuche werden anhand der vorliegenden Probengeometrie das Widerstandsmoment und anhand einer Soll-Biegespannung das Biegemoment berechnet.

Widerstandsmoment
$$W = \frac{(b \times d^2)}{6} \quad (\text{Breite } b \text{ und } d \text{ Dicke der Probe})$$

Biegemoment
$$M = \frac{W \times \sigma_{\text{soll}}}{1000}$$

Entsprechend dem jeweiligen geforderten Biegemoment wird dann eine hierzu passende Messfeder mit einer spezifischen Federkonstante in die

Wechselbiegemaschine eingebaut. Im nächsten Schritt wird die notwendige Kalibrierung der Wechselbiegemaschine an den Proben durchgeführt. Hierzu wurde zunächst eine Probe in die Maschine eingespannt und der Exzenter auf Werte von 0 bis 25 eingestellt. Die Veränderungen der Ausschläge bei den verschiedenen Exzentereinstellungen werden mittels Messuhr aufgetragen. Hieraus ergibt sich eine wie in Abbildung 42 gezeigte Kalibrierungskurve.

Die Wechselbiegeversuche wurden mit einer Frequenz von 50 Hz und einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ bei Raumtemperatur durchgeführt.

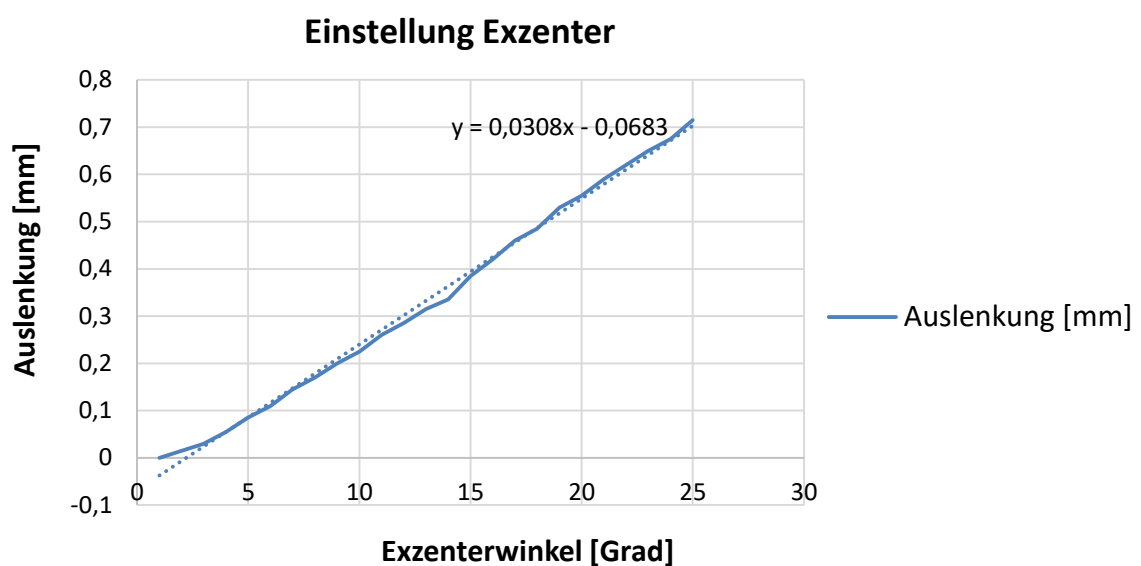


Abbildung 42: Kalibrierungskurve

Insbesondere bei den Versuchen mit einer Überdeckung von 1200 % zeigten die Ermüdungsproben auch in den Einspannstellen hohe Rauigkeiten auf, die dort zunächst zu vorzeitigen Brüchen führten. Diesem Problem wurde durch das Polieren der Einspannbereiche begegnet.

9. Versuchsergebnisse

9.1. Ergebnisse der Versuche an Umlaufbiegeproben mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden und Strahlmitteltypen

9.1.1. Rauigkeit

Abbildung 43 zeigt eine Übersicht der an den Umlaufbiegeproben in den unterschiedlichen Eingangszuständen (MP, EP) und Strahlzuständen gemessenen Rauigkeiten. Die Proben selber wurden immer im „as machined“ Zustand mit den verschiedenen Strahlmitteln und Überdeckungsgraden beaufschlagt um eine Vergleichbarkeit zu der Bearbeitung tatsächlicher Bauteile aus diesem Werkstoff beizubehalten.

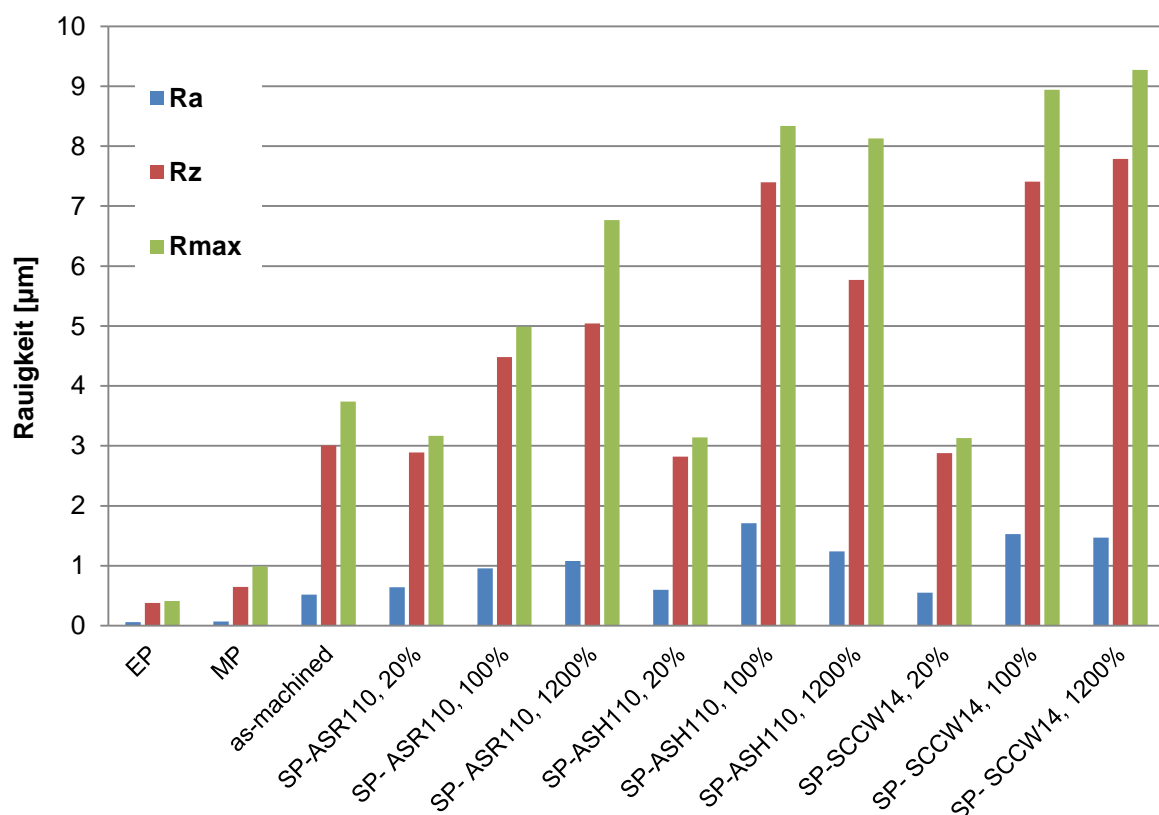


Abbildung 43: Übersicht der Rauigkeiten der unterschiedlich behandelten Umlaufbiegeproben

Klar ersichtlich ist, dass bereits der „as machined“ deutlich höhere Rauigkeiten aufzeigt als die Zustände EP und MP. Dabei bleiben die Werte mit R_a 0,52 μm aber deutlich unter der in vielen Herstellerspezifikationen maximal zulässigen Rauigkeit von R_a 1,6 μm nach der mechanischen (z.B. Drehen, Fräsen, Bohren) Vorbearbeitung.

Desgleichen bleiben alle mit bis zu 1200 % Überdeckung behandelten Proben mit maximal R_a 1,47 μm (gemessen bei SCCW14, 1200 %) deutlich unter der ebenfalls häufig spezifizierten maximal zulässigen Rauigkeit von 3,2 μm nach der Verfestigungsstrahlbehandlung.

Die mit allen 3 verwendeten Strahlmitteln unter 20 % Deckung bearbeiteten Proben zeigen nahezu unveränderte Rauigkeiten verglichen mit dem „as machined“ Zustand, da der bei weitem größte Teil der Oberfläche während der Strahlbearbeitung nicht mit Strahlmitteleinschlägen getroffen wurde und somit keine Veränderung zum Eingangszustand stattfindet.

Deutlich höhere Rauigkeiten sind bei den Überdeckungen von 100 % und 1200 % aller 3 Strahlmitteltypen zu verzeichnen. Den geringsten Anstieg zeigt hierbei das ASR110 welches im Vergleich zu 100 % Deckung mit der höchsten Steigerung bei der Erhöhung auf 1200 % reagiert. Dieser hier recht deutlich ausgeprägte Unterschied zwischen 100 % und 1200 % Deckung zeigt sich bei dem härteren Strahlmitteln SCCW14 ebenfalls aber deutlich schwächer ausgeprägt. Den umgekehrten Effekt gibt es bei dem ebenfalls härteren ASH110. Hier misst man bei hohen Überdeckungsgraden eine abnehmende Rauigkeit.

Die generell höhere Rauigkeit der beiden Strahlmittelsorten ASH110 und SCCW14 mag hierbei im Zusammenhang mit der höheren Härte stehen, wodurch diese im relativ weichen Ti-6Al-4V tiefere Kalotteneinschläge und damit auch Rauigkeiten hinterlassen. Die höchsten gemessenen Rauigkeiten beim SCCW14 lassen sich mit der geringeren Rundheit (Abbildung 26) gegenüber den beiden verwendeten Gussstrahlmittelsorten erklären.

Die Absenkung der Rauigkeit bei 1200 % Deckung im Vergleich zu 100 % beim ASH110 kann mit einem vermutlich beginnenden Einglättungseffekt erklärt werden. Hierbei werden die während der ersten Einschläge sich aufbauenden Kalottenränder von den nachfolgenden Kugeln getroffen und somit abgeflacht.

Das dieser Effekt beim weicheren ASR110 nicht auftritt kann zum einen an dem geringeren Härteunterschied zum bestrahlten Werkstoff und/oder an der leicht

erhöhten Strahlmittlegeschwindigkeit desselben gegenüber dem ASH110 liegen. Dieser Geschwindigkeitsunterschied ergibt sich wiederum aus der geforderten Strahlintensität von 0,20 mmA. Dabei ist bekannt, dass härtere Strahlmittel die gleiche Durchbiegung des Almenstreifens bei geringeren Geschwindigkeiten, d.h. geringeren kinetischen Energien erreichen als Strahlmittel mit geringerer Härte.

9.1.2. Eigenspannung

Die Messungen der Eigenspannungen in die Tiefe der mit den Strahlmitteln ASH110 und SCCW14 und den Überdeckungsgraden von 20 %, 100 % und 1200 % wurden mittels dem in Kapitel 7.5 beschriebenen Bohrlochverfahren durchgeführt.

Auf die Eigenspannungsmessung mit dem ASR110 Strahlmittel wurde an dieser Stelle verzichtet, da dessen Auswirkungen auf dasselbe Material Bestandteil eingehender Untersuchungen in den Versuchen mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln und Überdeckungsgrad (siehe Kapitel 8.2) ist.

Da der Durchmesser der Umlaufbiegeproben mit einem Durchmesser von 6 mm für das Aufbringen der Dehnmessstreifen als auch für eine nachfolgende Durchführung des Anbohrrens ungeeignet ist, wurden aus demselben Stangenmaterial zylindrische Scheiben mit einer Höhe von ca. 26 mm hergestellt, die einseitig mit den jeweiligen Parametersätzen verfestigungsgestrahlt wurden.

Abbildung 44 zeigt eine solche scheibenförmige Materialprobe mit einem aufgetragenen Dehnmessstreifen im bereits vermessenen, d.h. angebohrten Zustand.

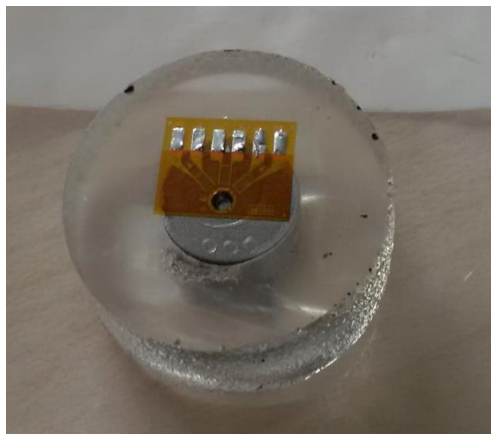


Abbildung 44: Materialprobe mit Dehnmessstreifen zur Eigenspannungsmessung mittels Bohrlochverfahren

Während sich bei der Eigenspannungsmessung bei allen Varianten mit 100 % und 1200 % Überdeckung keine signifikanten Auffälligkeiten ergaben, wiesen die Ergebnisse bei 20 % Überdeckung sehr deutliche Unterschiede auch innerhalb ein und derselben Variante auf.

Abbildung 45 zeigt hierbei ein Beispiel für die Messung einer mit SCCW14 gestrahlten Probe mit einer Überdeckung von 20 %. Deutlich ersichtlich ist der unterschiedliche Eigenspannungsverlauf von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von ca. 0,1 mm bei Verwendung derselben Kugelstrahlparameter.

Ab einer Tiefe von etwas oberhalb 0,1 mm schmiegen sich beide gemessenen Eigenspannungskurven aneinander an und gehen in eine ca. 150 MPa betragende Zugspannung über. Da sich beide gemessenen Eigenspannungskurven ab dem Nulldurchgang ebenfalls aneinander anschmiegen kann bei einer Überdeckung von 20 % von einer lokal sehr unterschiedlichen und im Vergleich zu den später dargestellten höheren Überdeckungsgrad sehr geringen Eindringtiefe der durch das Verfestigungsstrahlen lokal erzeugten Druckeigenspannung ausgegangen werden.

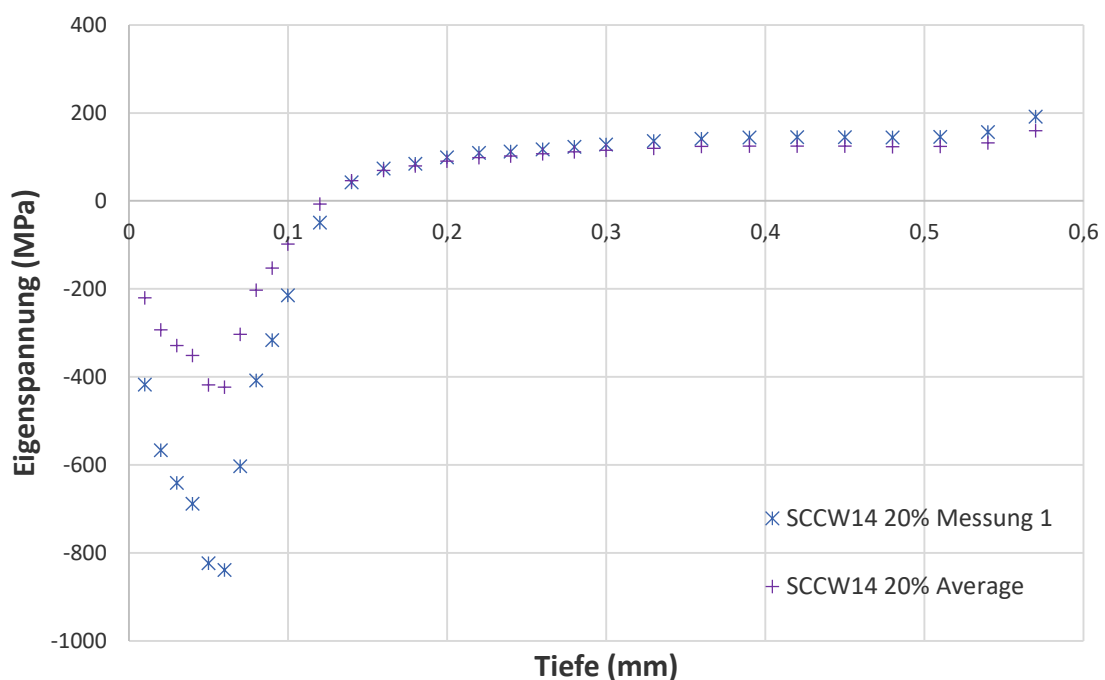


Abbildung 45: Unterschiedliche Eigenspannungstiefenverläufe an mit SCCW14 und 20 % Überdeckung verfestigungsgestrahlten Proben

Als Ursache für diese stark unterschiedlichen Eigenspannungstiefenverläufe wurde die zufällige Lage der einzelnen Kalotten und deren relative Position zu den später aufgetragenen Dehnmessstreifen ausgemacht.

Abbildung 46 zeigt hierbei zwei Varianten bei der bei Bild (a) der Bohrbereich des Dehnmessstreifens von in diesem Fall fünf ersichtlichen Kalotten berührt wird während im Bild (b) derselbe Bereich nur eine ausgeprägte Kalotte erkennen lässt.

Diese sich aus dem bei 20 % Überdeckung zwangsläufig ergebende zufällige Verteilung der Partikeleinschläge und deren Position zum unmittelbaren Messbereich führen aller Voraussicht nach zu den stark unterschiedlichen gemessenen Eigenspannungswerten.

Da eine sinnvolle und zielführende Bewertung dieser sehr inhomogenen Ergebnisse zu keinem schlüssigen Ergebnis führt wurde in dieser Arbeit auf weitere Messungen der Varianten mit 20 % Überdeckung abgesehen.

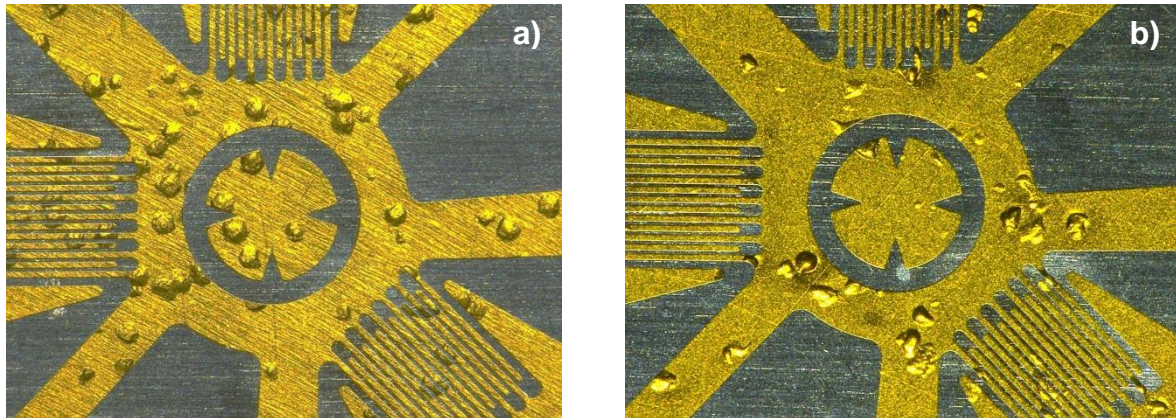


Abbildung 46: Dehnmessstreifen bei 20 % Deckung mit (a) und ohne (b) Kugeleindrücke im Bohrbereich

In der folgenden Abbildung 47 sind die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen für die Strahlmitteltypen ASH110 und SCCW14 bei einer Überdeckung von 100 % und 1200 % dargestellt.

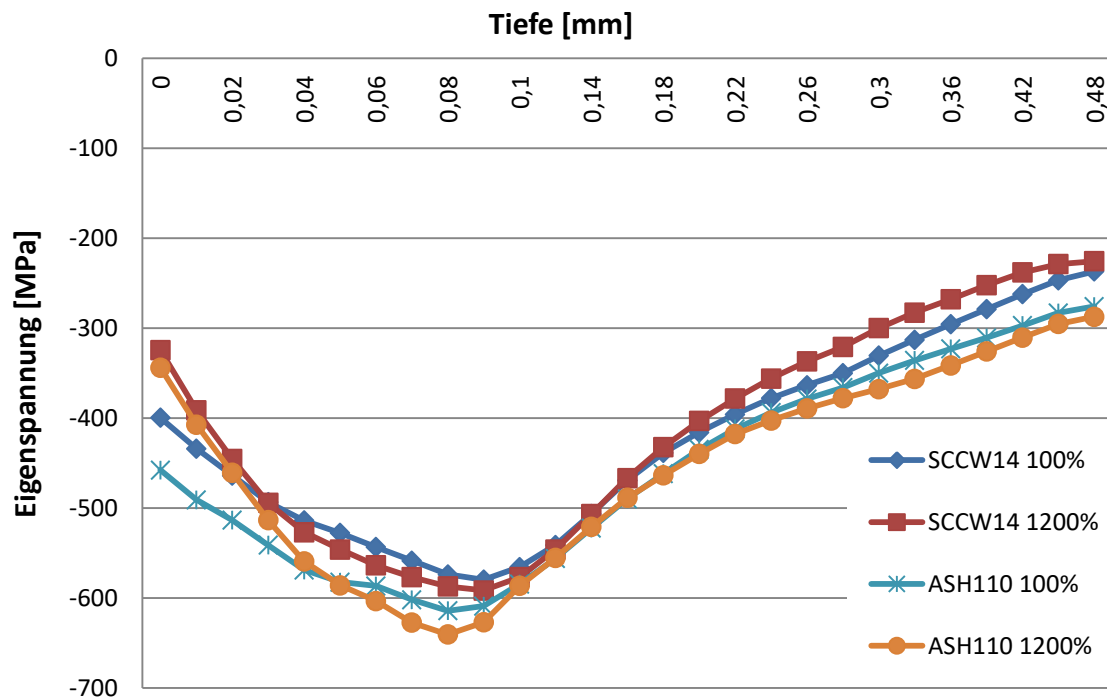


Abbildung 48: Eigenspannungsverlauf der mit SCCW14 und ASH110 und Überdeckungen von 100 % und 1200 % gestrahlten Umlaufbiegeproben

Alle vier Proben bilden ein Maximum der Eigenspannung in einer Tiefe von ca. 0,08 - 0,10 mm aus.

Den höchsten Druckeigenspannungswert von jeweils über -600 MPa erzeugt hierbei das Strahlmittel ASH110 mit 1200 % Überdeckung und -640 MPa gefolgt von demselben Strahlmitteltyp mit 100 % Überdeckung und einem Ergebnis von -614 MPa. Die beiden Varianten des SCCW14 liegen hierbei fast Deckungsgleich bei -592 MPa bei 1200 % und -579 MPa bei 100 % Überdeckung.

Deutlichere Unterschiede kann man im oberflächennahen Bereich ausmachen, wobei diese Werte bei der Bohrlochmethode bis zu einer Tiefe von ca. 0,02mm mit verfahrenstechnischen Unsicherheiten belegt sind.

Bei einer Tiefe von 0,02 mm ergeben sich die höchsten gemessenen Druckeigenspannungen für die jeweils mit 100 % Überdeckung gestrahlten Proben mit ASH110 bei -491 MPa gefolgt von dem SCCW14 mit -434 MPa. Die geringste Druckeigenspannung ergibt sich für das SCCW14 mit 1200 % Überdeckung und einem Wert von -391 MPa.

Bezüglich der Einwirktiefe liegen alle vier Varianten in sehr ähnlichen Bereichen.

9.1.3. Lebensdauer

Die folgenden Wöhlerkurven veranschaulichen die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen an den mit den drei unterschiedlichen Strahlmitteln (ASR110, ASH110, SCCW14) unter verschiedenen Überdeckungsgraden (20 %, 100 %, 1200 %) verfestigungsgestrahlten Umlaufbiegeproben.

Dabei ist zu beachten, dass die Lebensdaueruntersuchungen mit den Überdeckungsgraden von 20 % und 100 % an derselben, die mit 1200 % nachfolgend an einer unterschiedlichen Materialcharge derselben Legierung von Ti-6Al-4V durchgeführt wurden und von daher auch separat betrachtet werden müssen. Abbildung 49 zeigt hierbei die Übersicht über alle drei verwendeten Strahlmittel bei einer Deckung von jeweils 20 % und 100 % in Bezug zum EP Zustand.

Im Bereich der Dauerfestigkeit liegen alle mit 100 % Deckung gestrahlten Proben oberhalb des eigenspannungsfreien EP Zustandes. Den umgekehrten Effekt erhält man bei allen weiteren mit 20 % Deckung verfestigungsgestrahlten Proben, mit einer Ausnahme beim SCCW14, der dasselbe Niveau wie EP erreicht.

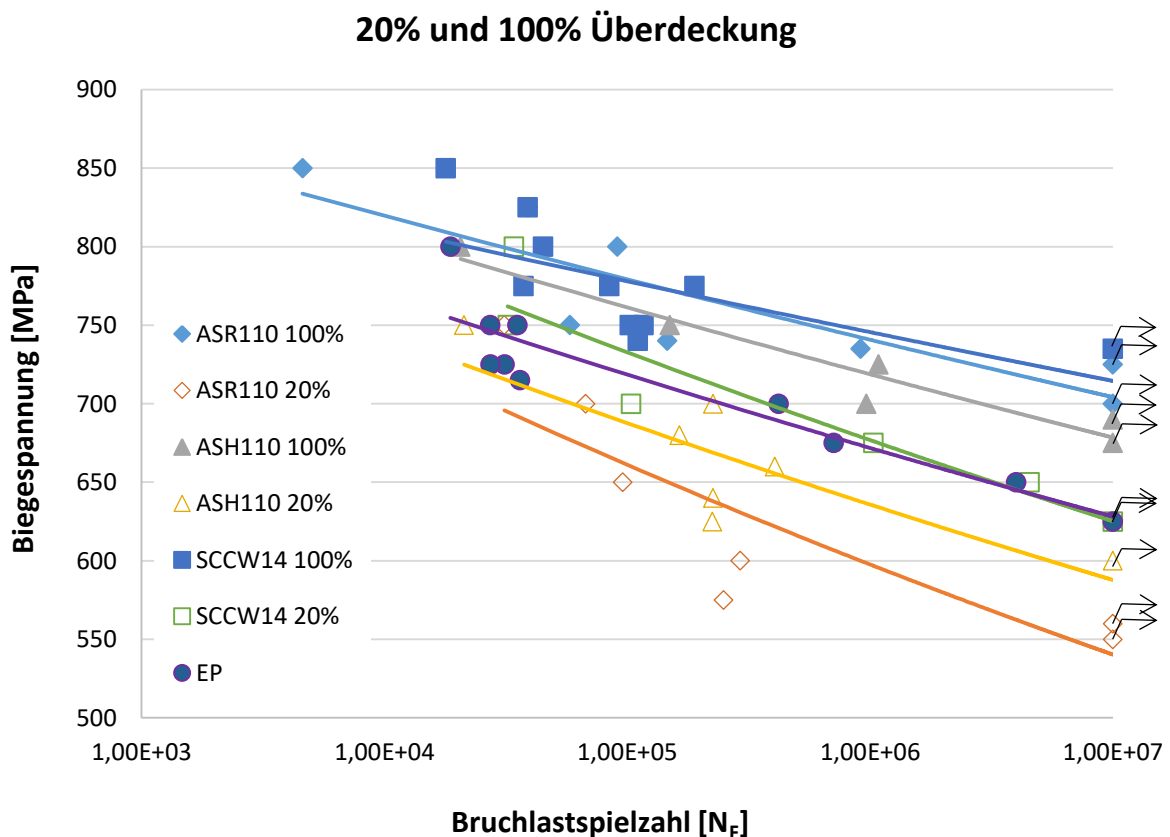


Abbildung 49: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SCCW14 mit 20 % und 100 % Deckung verfestigungsgestrahltem Zustand

In den beiden folgenden Abbildungen ist die eindeutige Tendenz der Verbesserung der Biegewechselfestigkeit bei Überdeckungsgraden von 100 % (Abbildung 50) bzw. Verschlechterung bei einem Überdeckungsgrad von 20 % (Abbildung 51) in Bezug auf den spannungsfreien EP Zustand für die jeweiligen drei zur Anwendung gekommenen Strahlmittel (ASR110, ASH110, SCCW14) separiert worden.

Bei den Ergebnissen mit 100 % Deckung zeigt das Strahlmittel SCCW14 den höchsten, während das ebenfalls harte ASH110 den geringsten Anstieg der Dauerfestigkeit aufweist. Das im Vergleich zu den beiden anderen Strahlmitteln relativ weiche ASR110 kommt zwischen beiden zuvor genannten Strahlmitteltypen zum Liegen.

Tendenziell zeigt sich im Bereich von 10^7 Lastwechseln eine je nach Strahlmittel erreichte Steigerung der dauerhaft ertragbaren Umlaufbiegespannung von ca. +9 % für das ASH110, +14 % für das ASR110 und maximal +18 % für das SCCW14.

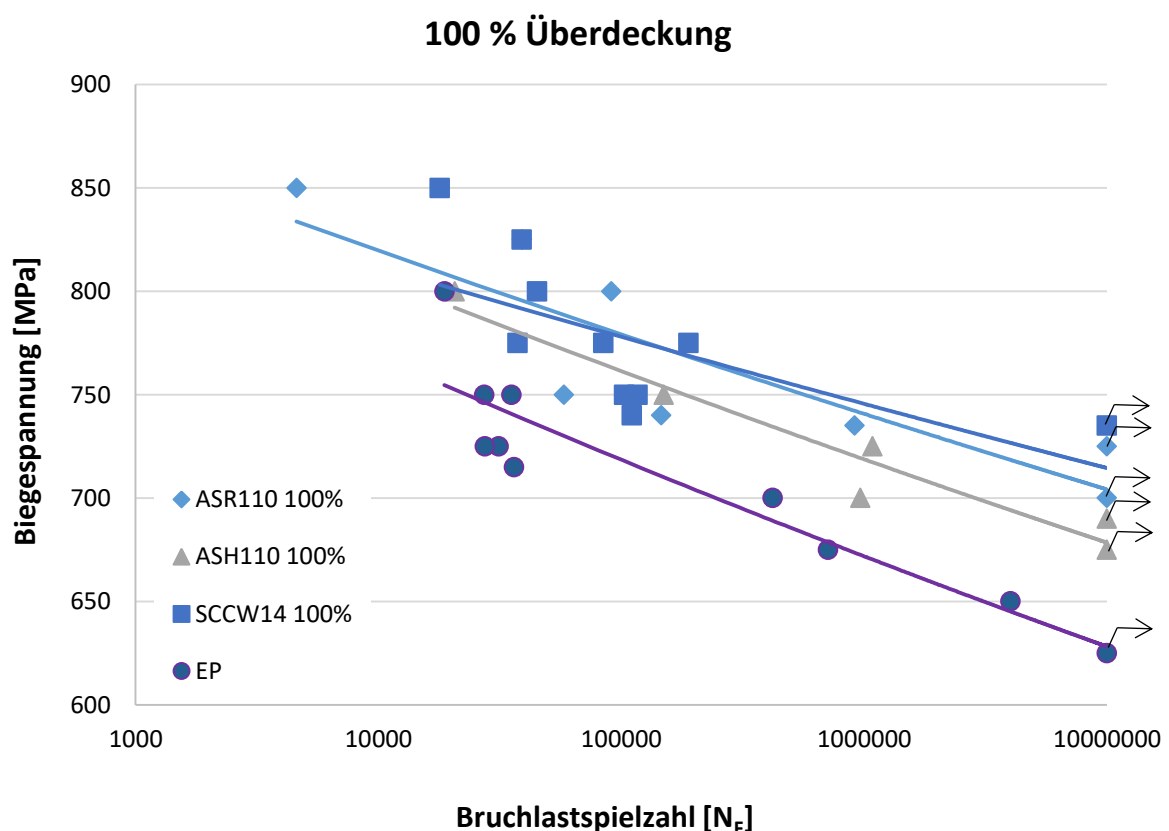


Abbildung 50: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SCCW14 mit 100 % Deckung verfestigungsgestrahltm Zustand

Betrachtet man die Ergebnisse mit der geringen Überdeckung von 20 % in Abbildung 51 so muss die größte Reduzierung der Biegewechselfestigkeit in Bezug auf den EP Zustand bei 10^7 Lastwechseln dem ASR110 mit ca. -11 % zugeschrieben werden. Beim ASH110 reduziert sich die Biegewechselfestigkeit um ca. -4 % gegenüber dem EP Zustand, während das SCCW14 auf dem nahezu gleichen Lastniveau zum Liegen kommt und damit für die hier vorliegenden Proben keinen Effekt weder in positiver noch negativer Richtung zur Folge hatte.

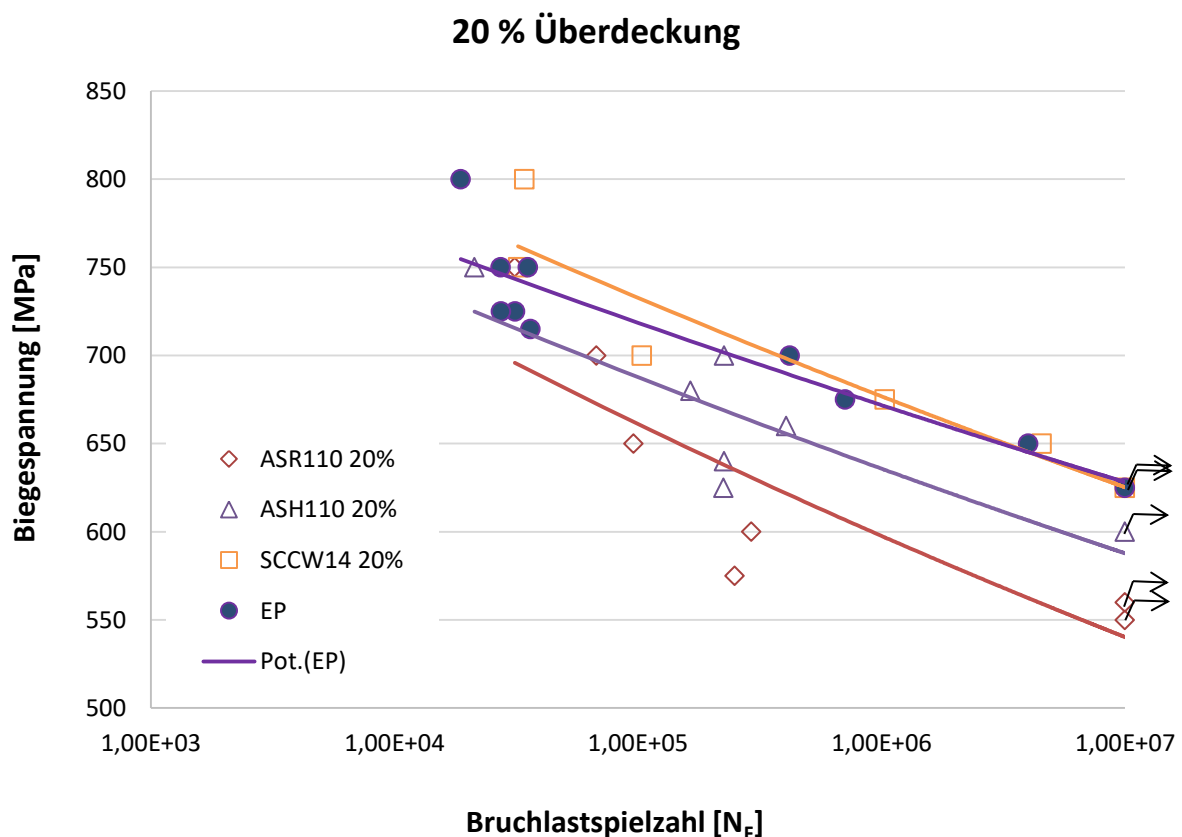


Abbildung 51: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SCCW14 mit 20 % Deckung verfestigungsgestrahlt

Ziel der Dauerfestigkeitsuntersuchungen mit unterschiedlichen Überdeckungsgraden und Strahlmitteln war einen direkten Vergleich für denselben Werkstoff herauszuarbeiten. Auf Basis der Anzahl der Versuche – und hier insbesondere einer unvermeidlichen aber dennoch unterschätzten hohen Anzahl von Fehlversuchen – musste für die Untersuchungen mit einer Deckung von 1200 % auf eine Nachlieferung der zumindest auf Basis der Papierlage (Prüfzeugnis) selbigen Materialcharge zurückgegriffen werden. Nach ersten vergleichenden

Untersuchungen kam es jedoch zu inkonsistenten Ergebnissen die zu einer genaueren Untersuchung der Materialkennndaten und Kristallografie des nachgelieferten Materials führten. Wie bereits in Kapitel 7.1 ausgeführt wurden zwar vergleichbare Materialkennndaten aber durchaus unterschiedliche kristallografische Strukturen (veränderte Verteilung der α - und β Phasen) detektiert welche vermutlich zu der Inkonsistenz der Ergebnisse der Dauerfestigkeitsversuche führte. Auf Basis dieser Tatsache müssen die in Abbildung 52 ermittelten Daten separat betrachtet werden.

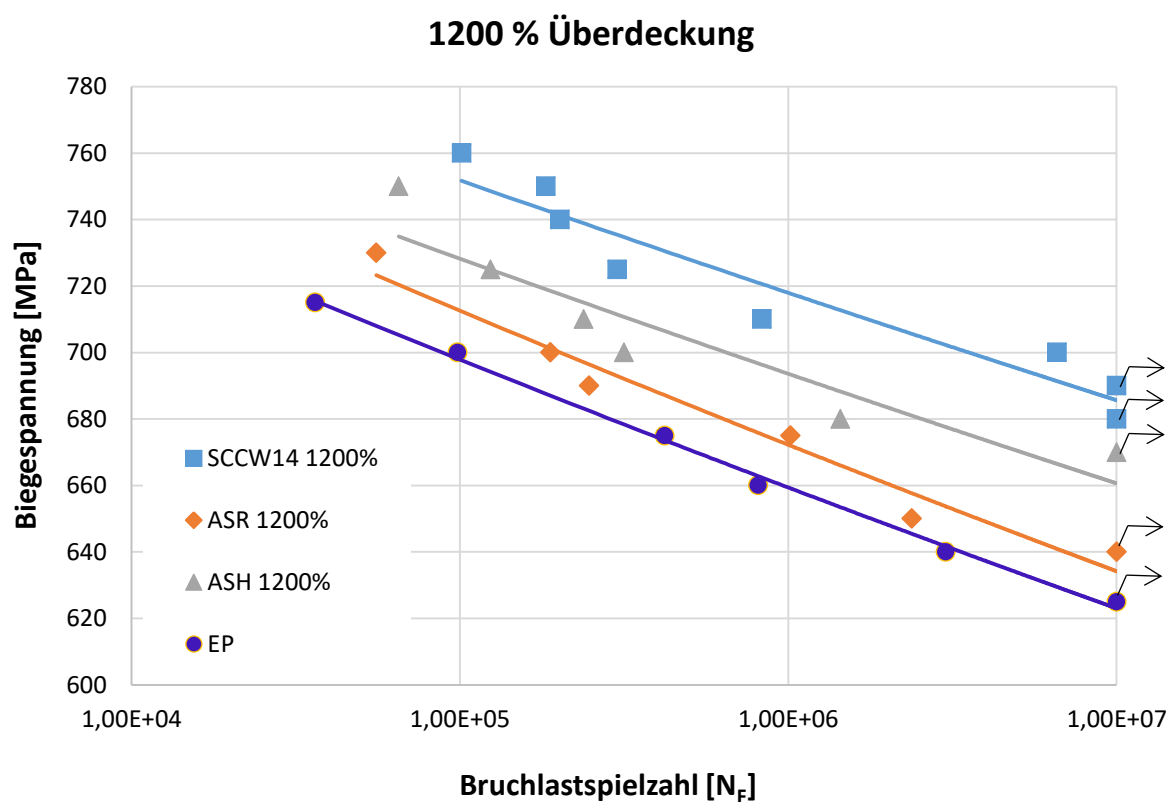


Abbildung 52: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SCCW14 mit 1200 % Deckung verfestigungsgestrahltm Zustand

Die Ergebnisse (Abbildung 52) der an dieser nachgelieferten Materialcharge des Ti-6Al-4V durchgeführten Versuche mit einer Deckung von 1200 % zeigen ebenfalls einen signifikanten Anstieg der Dauerfestigkeit im gestrahlten Zustand gegenüber dem EP Zustand. Den höchsten Anstieg zeigt hierbei das Strahlmittel SCCW14 mit einem Plus von ca. +10 %, gefolgt vom ASH110 mit ca. +7 % und schließlich dem ASR110 mit dem geringsten zu verzeichnenden Anstieg von gut +2 %.

Versucht man die Ergebnisse der beiden untersuchten Materialchargen in Beziehung

zu setzen, so ist hierbei der jeweilige Bezug zum EP Zustand vermutlich am besten geeignet.

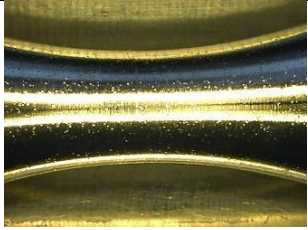
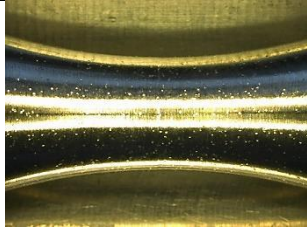
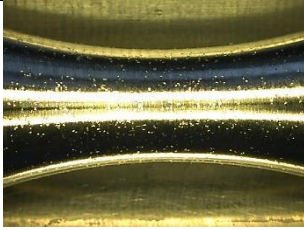

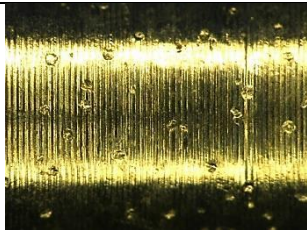

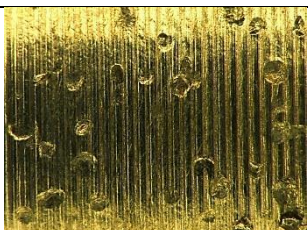
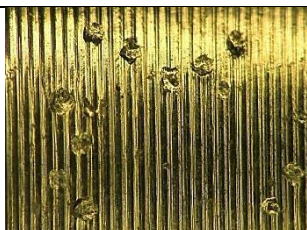
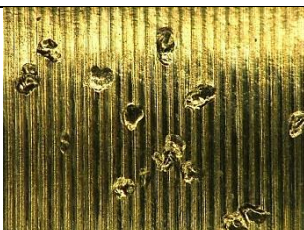
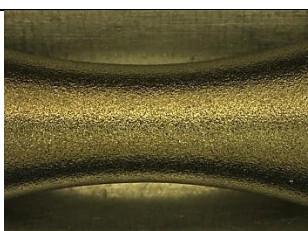
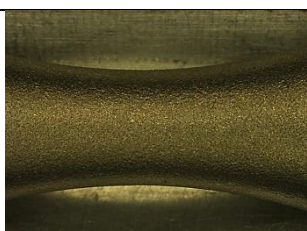



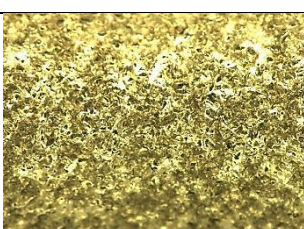
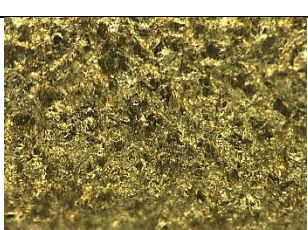
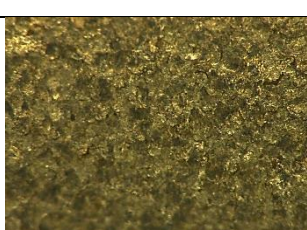

Interessant ist hierbei nur der Vergleich des mit 100 % und 1200 % Deckung gestrahlten Zustandes.

In beiden Fällen kommt es zu einem deutlichen Anstieg gegenüber dem Zustand EP. Die größte Steigerung findet man sowohl bei 100 % und 1200 % Überdeckung bei Verwendung des Strahlmittles SCCW14 mit einem Anstieg um +10 bzw. +18 %.

Einen wesentlichen Unterschied sieht man in den Ergebnissen der beiden verwendeten Gussstrahlmittel unterschiedlicher Härte. Während bei der ursprünglich verwendeten Materialcharge gestrahlt mit 100 % Überdeckung das ASR110 höhere Steigerungen erzeugt als das ASH110 verhält es sich bei der nachträglich beschafften Materialcharge gestrahlt mit 1200 % genau anders herum.

Inwieweit diese Umkehrung der Ergebnisse bei Verwendung des Gussstrahlmittels auf die unterschiedlichen kristallografischen Eigenschaften des verwendeten Ti-6Al-4V oder den deutlich auseinanderliegenden Überdeckungsgradunterschieden zurück zu führen ist konnte innerhalb dieser Arbeit nicht geklärt werden.

9.1.4. Mikroskopie

Über- deckung	Vergrö- serung	Strahlmittel		
		ASR110	ASH110	SCCW14
20 %	1x			
	100x			
	200x			
100 %	1x			
	100x			
	200x			

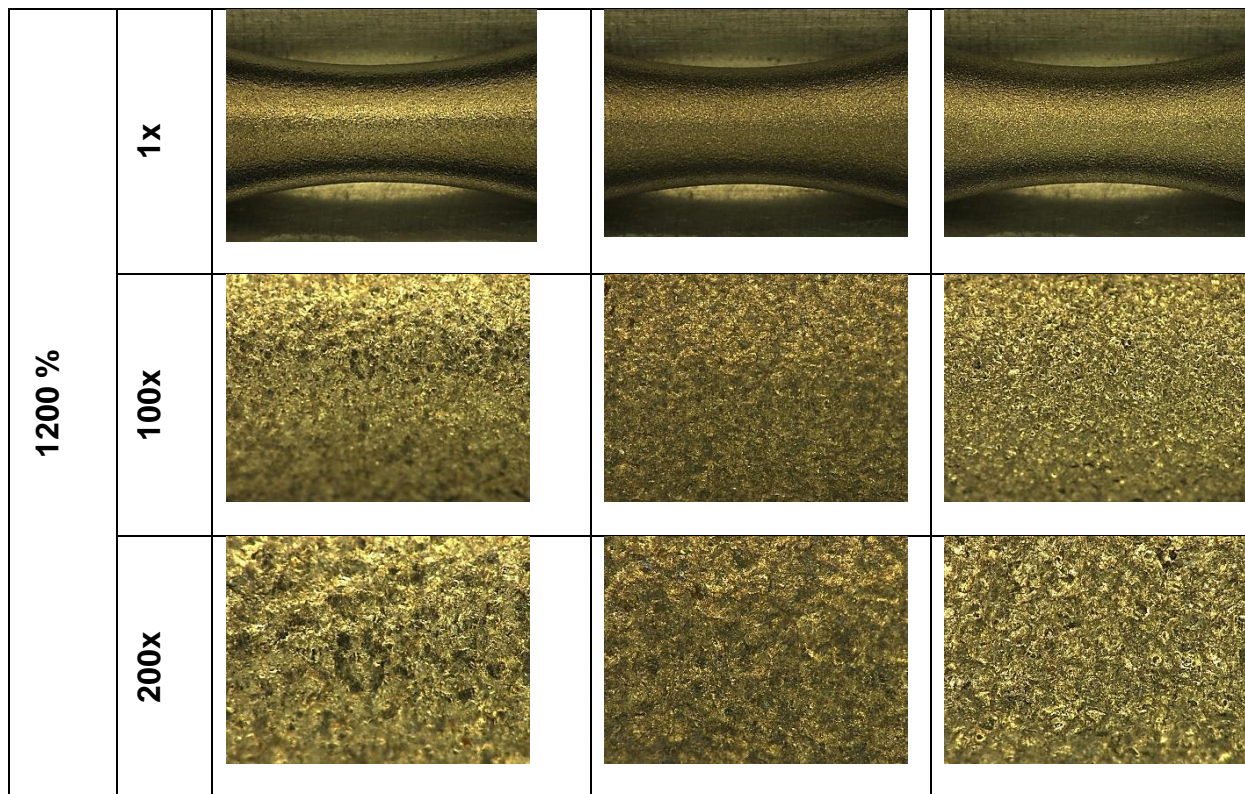


Abbildung 53: Übersicht der Oberflächenstruktur der Umlaufbiegeproben verfestigungsgestrahlt mit ASR110, ASH110 und SCCW14, Überdeckungsgraden von 20 %, 100 % und 1200 % bei einer Vergrößerung von 1x, 100x und 200x

Abbildung 53 zeigt eine Übersicht der gestrahlten Oberfläche der Umlaufbiegeproben aller Varianten der drei unterschiedlichen verwendeten Strahlmitteltypen (ASR110, ASH110, SCCW14) in Kombination mit den drei Überdeckungsgraden (20 %, 100 %, 1200 %) bei einer 1x, 100x und 200x Vergrößerung.

Deutlich markant setzen sich hierbei die einzelnen Kalotten der Strahlpartikel bei einer Deckung von 20 % insbesondere bei 200x Vergrößerung gegenüber der ebenfalls deutlich ersichtlichen Grundstruktur welche vom Drehen herrührt ab. Hier mag man auch einen tendenziell sanfteren Abdruck der runderen Gusspartikel (ASR110, ASH110) gegenüber dem zwar verrundetem aber dennoch eckigeren Drahtkorn (SCCW14) mit einer klaren Ausprägung zum dazu noch weicheren ASR110 Strahlmittel erkennen.

Im klaren Kontrast hierzu ist bei der Oberfläche mit 100 % und 1200 % Überdeckungsgrad keinerlei erkennbare Drehstruktur mehr zu erkennen. Signifikante Unterschiede zwischen den Überdeckungsgraden mit 100 % und 1200 % als auch

Strahlmitteltypen sind hierbei kaum erkennbar und eher unterschiedlichen Reflexionsvermögen zuzuordnen. Dabei zeigt insbesondere die Variante mit dem ASR110 bei 1200 % Deckung eine glänzendere Oberfläche, was mit den gemessenen relativ geringeren Rauigkeitswerten im Vergleich zu den anderen Versionen einhergeht. Hier scheint sich ein zuvor schon angesprochener Einglättungseffekt bedingt durch die hohen Überdeckungsgrade einzustellen.

In Abbildung 54 konnte der Rissbildungsort und das weitere Ausbreiten bzw. Zusammenwachsen eines Risses über zwei vereinzelte Kalottenabdrücke lokalisiert werden bevor die Umlaufbiegeprobe vollständig versagte. Die Ausbildung von Ermüdungsrissen bevorzugt aus solchen vereinzelten Strahlmittelabdrücken direkt an der Bauteiloberfläche bei Überdeckungsgraden deutlich unter 100 % bestätigt die Erkenntnis, dass diese einzelnen Abdrücke wie Kerben mit lokalen Spannungsunterschieden an der Oberfläche eines solchen Bauteils fungieren und somit zu einer Reduzierung der Biegewechselfestigkeit bzw. Lebensdauer beitragen.

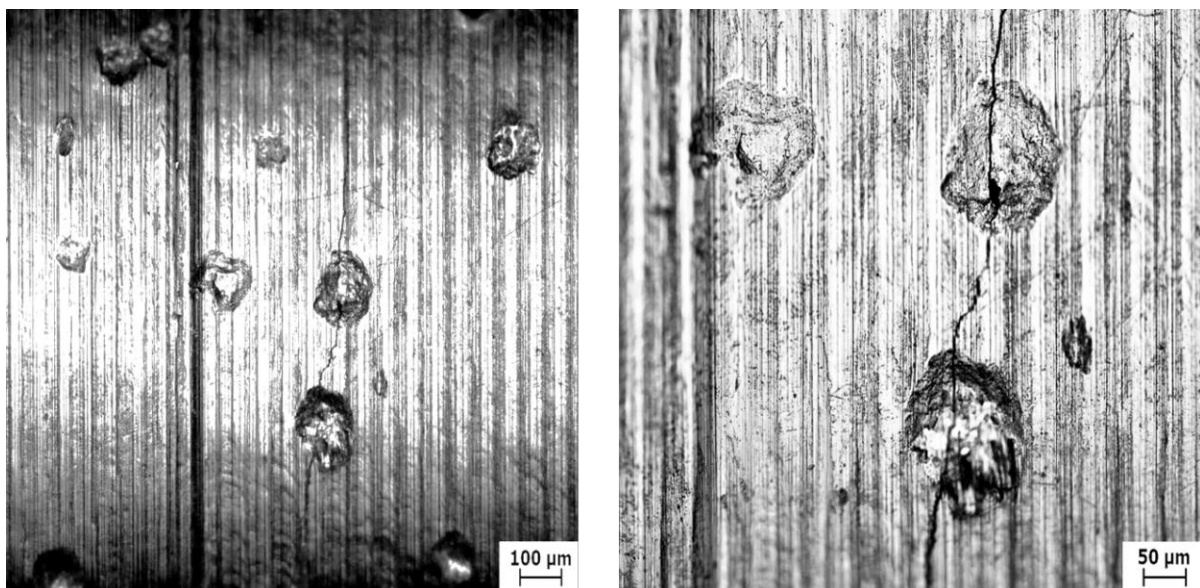


Abbildung 54: Rissbildungsort nach dem Verfestigungsstrahlen (ASH110, 20 % Überdeckung)

Bei Erreichen und Überschreiten eines Überdeckungsgrades von annähernden 100 % bilden sich die zum Versagen der Proben führenden Risse in aller Regel unterhalb der Oberfläche im Bereich des Übergangs der durch das Verfestigungsstrahlen erzeugten Druckeigenspannungen in Zugeigenspannungen aus. Die auch durch das Verfestigungsstrahlen bedingt sehr früh auftretenden Risse im unmittelbaren Bereich

der Oberfläche werden bei einer ab ca. 100 % erreichten Überdeckung durch die sich gleichmäßig über die gesamte Oberfläche erzeugte Druckeigenspannungszone in Verbindung mit der einhergehenden Erhöhung der Versetzungsdichte in Ihrer Ausbreitung behindert, so dass Sie für die Bauteillebensdauer in aller Regel keine Auswirkung haben.

Da sich diese homogene randschichtnahe Druckeigenspannungsschicht bei Überdeckungsgraden wie hier von 20 % noch nicht einstellen kann fungieren die einzelnen Einschlüsse häufig als lokale Rissinitiierungen.

9.2. Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad an Wechselbiegeproben

9.2.1. Rauigkeit/Welligkeit

Abbildung 55 zeigt eine Übersicht der gemessenen Rauigkeiten an den verwendeten Wechselbiegeproben über alle Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrade im Vergleich zum Eingangszustand „as machined“.

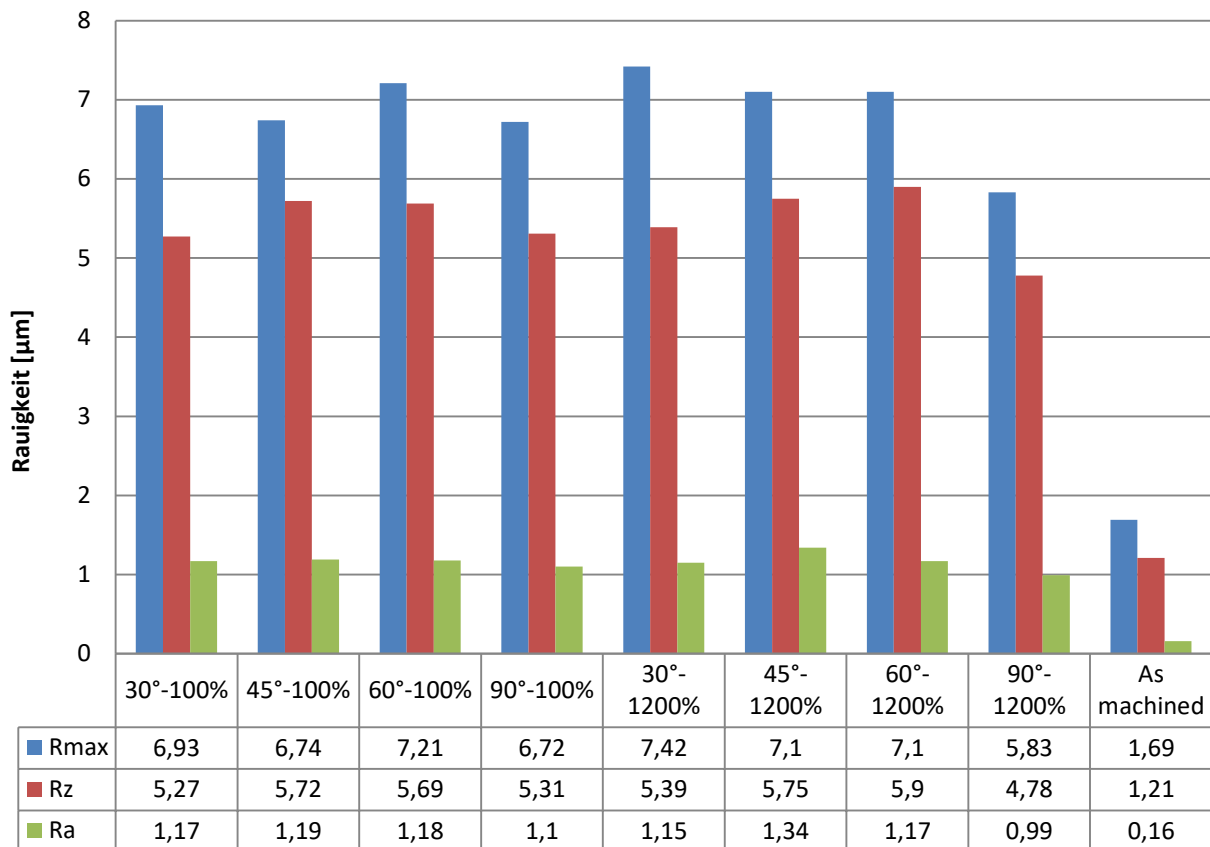


Abbildung 55: Übersicht der Rauigkeiten an den Wechselbiegeproben im „as machined“ Zustand und bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90 Grad mit 100 % und 1200 % Überdeckung

Die Eingangsrauigkeit im „as machined“ Zustand, d.h. im feingedrehten Zustand, ist mit gemessenen Ra 0,16 µm deutlich unter der in Luftfahrtnormen häufig spezifizierten Forderung von < Ra 1,6 µm. Auch die nach der Strahlbehandlung maximal gemessenen Rauigkeiten von Ra 1,34 µm (45°, 1200 %) bleiben unter der

Forderung von R_a 3,2 μm welche häufig als Herstellervorgabe für Oberflächen nach der kugelstrahltechnischen Bearbeitung zu finden ist.

Tendenziell findet man den geringsten Anstieg der Rauigkeit bei einem Einstrahlwinkel von 90° . Höhere Rauigkeiten findet man bei flacheren Einstrahlwinkeln, wobei bei 100 % Deckung die Probe mit 60° und 45° höchste Werte anzeigen und bei 1200 % Deckung je nach betrachtetem Rauigkeitsmesswert die unter 30° bis 60° Einstrahlwinkel bearbeiteten Proben unterschiedliche Werte anzeigen.

Die unter 30° gestrahlten Proben muss man hier generell separat betrachten, da aus anlagentechnischen Gründen die Intensität mit erreichten 0,16 mmA deutlich unter den für alle anderen Einstrahlwinkel angewendeten 0,20 mmA zum Liegen kam.

Erkennbar geringer ist die Rauigkeit der 90° Proben bei 1200 % gegenüber 100 % Deckung. Die hier bei 1200 % Deckung gemessenen geringeren Rauigkeiten können dabei mit dem bereits in Kapitel 9.1.1 beschriebenen Einglättungseffekt in Zusammenhang gebracht werden. Das heißt mit steigender Überdeckung werden die entstandenen Kalottenränder durch nachfolgende Kugeln immer mehr abgeflacht und bauen sich gleichzeitig auch immer weniger auf, wodurch sich mit steigender Deckung eine geringere Rauigkeit ergibt.

Neben den standardmäßig verwendeten Rauigkeitsmesswerten R_a , R_z und R_{max} ergab sich aus der visuellen Betrachtung und der weiterführenden Mikroskopie noch ein weiterer Aspekt der mit der Welligkeit W_t beschrieben werden kann.

Hierzu sind die Oberflächen der untersuchten Proben in Abbildung 57 für 100 % und in Abbildung 56 für die Überdeckung mit 1200 % dargestellt.

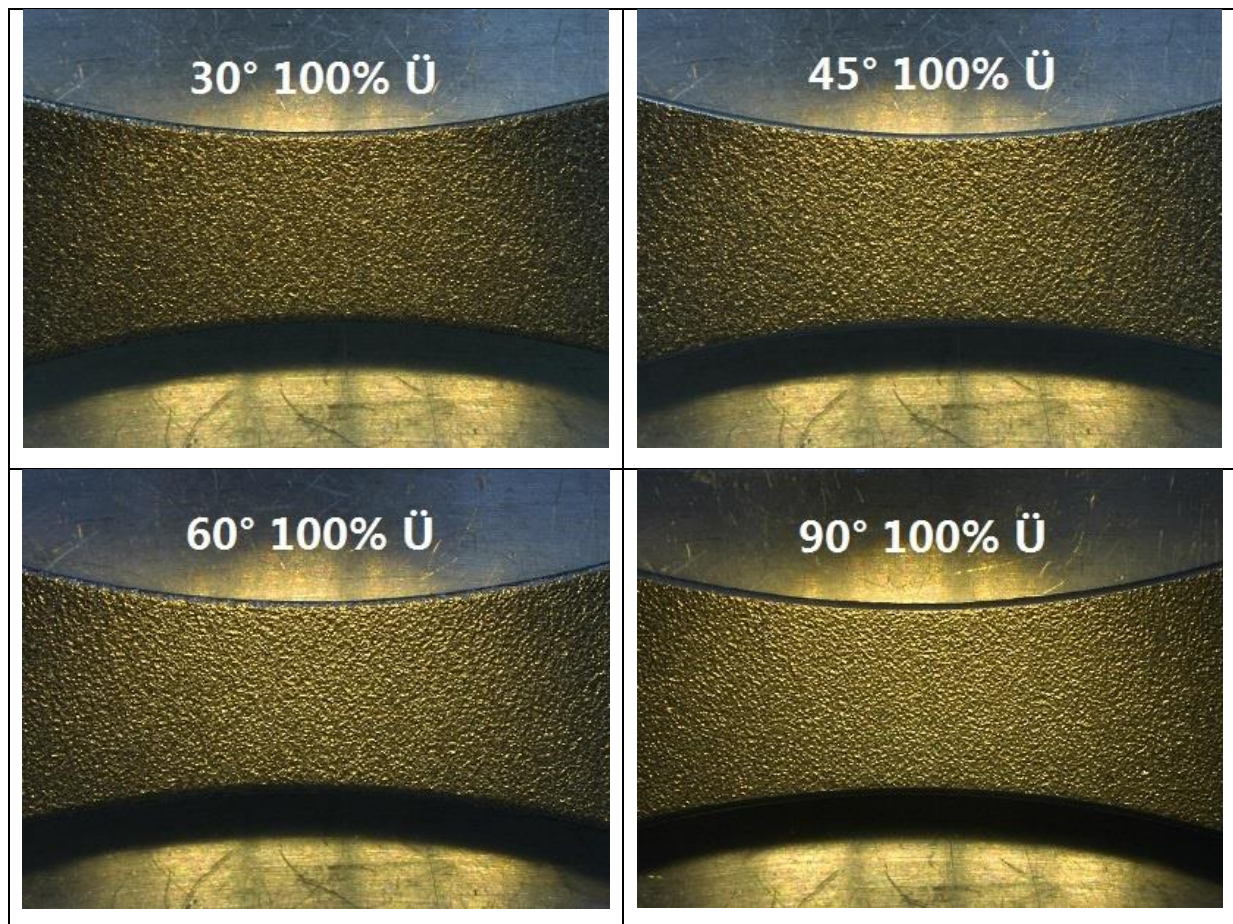
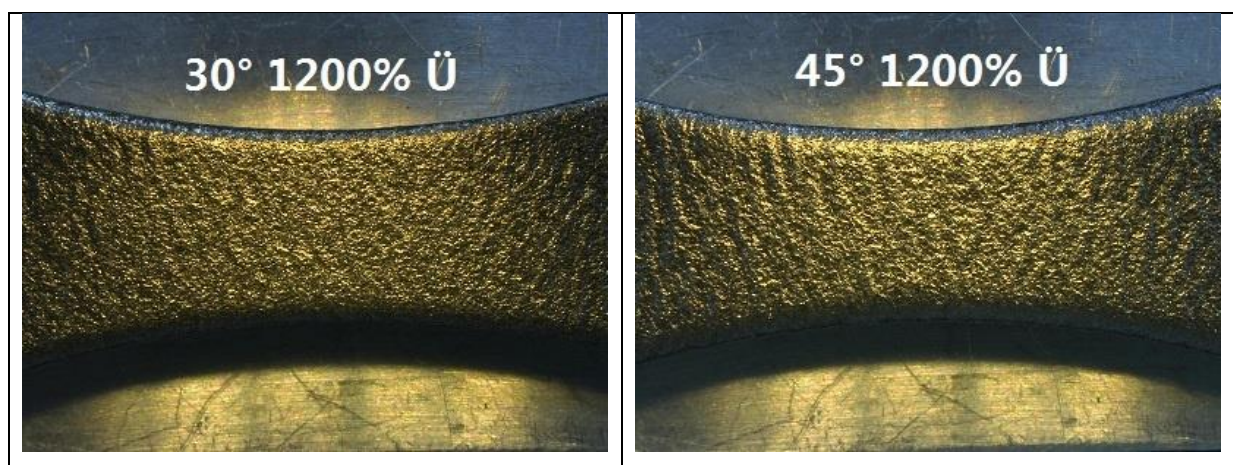


Abbildung 57: Mikroskopie für 100 % Überdeckungsgrad bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90°

Während sich aus der optischen Ansicht der Oberflächen mit 100 % Überdeckung (Abbildung 57) ohne Vergrößerung keine wesentlichen Unterschiede für die vier zur Anwendung gekommenen Einstrahlwinkel ausmachen lassen, zeigt das Ergebnis für eine Überdeckung mit 1200 % (Abbildung 58) deutliche Unterschiede.



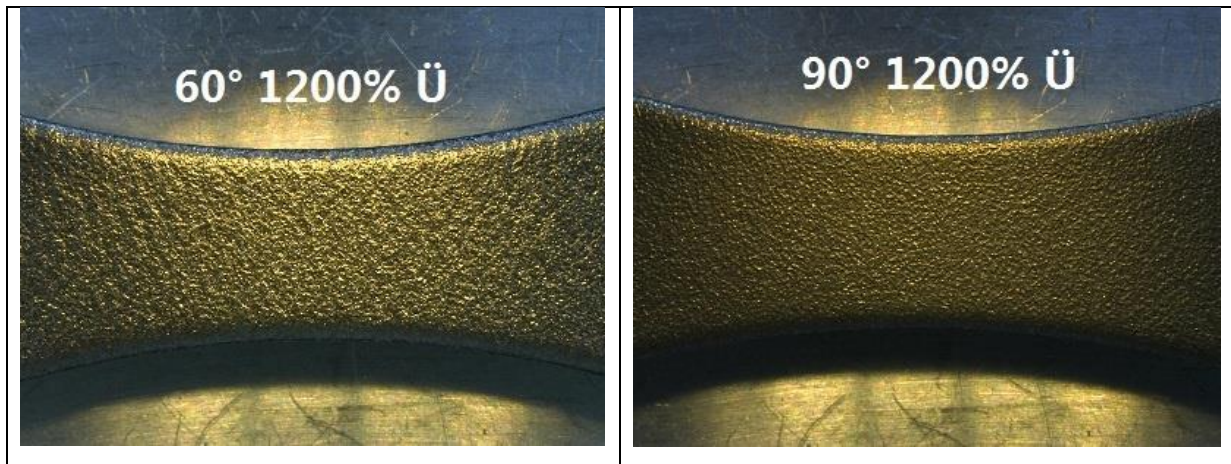


Abbildung 58: Mikroskopie für 1200 % Überdeckungsgrad bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90°

Betrachtet man Abbildung 58 detailliert, so zeigt sich bereits ab einem Einstrahlwinkel von 60° an der Oberfläche eine anfänglich aufbauende Welligkeit. Die zumindest optisch sichtbar stärkste Ausprägung der Welligkeit ergab sich bei einem Einstrahlwinkel von 45° und einer Deckung von 1200 %. Anhand der in Tabelle 10 gemessenen Werte lässt sich schnell erkennen, dass die Welligkeit mit flacherem Einstrahlwinkel zunimmt und bei höheren Überdeckungsgraden am deutlichsten ausgeprägt ist.

Grund für die Welligkeit wird dem mit zunehmend kleinerem Einstrahlwinkel grösser werdende Anteil des parallel zur Werkstückoberfläche verlaufenden Geschwindigkeitsanteils (Abbildung 19) der aufprallenden Strahlmittelpartikel zuzuordnen sein. Wie bereits in Kapitel 6.2.4 beschrieben wird hierdurch das Material des Strahlguts im oberflächennahen Bereich mit jedem neuen Einschlag quasi vor dem Strahlmittelstrom hergeschoben, woraus sich – wie auf einer vom Wind bestrichenen Wasseroberfläche - mit steigender Überdeckung ein wellenförmiges Profil ergibt.

Dieser Effekt wird zusätzlich durch die mit flacherem Einstrahlwinkel zur Beibehaltung der geforderten Strahlintensität ansteigende Aufprallgeschwindigkeit der Strahlpartikel verstärkt. Selbigen Effekt beobachtet man häufig auch auf Strahlvorrichtungen, die im Laufe der Nutzung mit extrem hohen Strahlzeiten und damit einhergehenden Überdeckungsgraden beaufschlagt werden.

Die Werte mit 30° Einstrahlwinkel müssen wiederum separat betrachtet werden, da hier anlagentechnisch nur eine geringere Intensität (0,16 mmA) erprobt werden konnte.

Tabelle 10: Welligkeit der mit unterschiedlichem Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad verfestigungsgestrahlten Wechselbiegeproben

Einstrahlwinkel [Grad]	Welligkeit W_t [μm]	
	100 % Deckung	1200 % Deckung
90	2.50	3.25
60	2.53	5.93
45	5.00	13.67
30	(3.71)	(6.15)

9.2.2. Eigenspannung

In der folgenden Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Eigenspannungsmessung bei den unterschiedlichen Einstrahlwinkeln von 90, 60, 45 und 30 Grad und den Überdeckungsgraden von 100 % und 1200 % dargestellt.

Alle Proben wurden mit der geforderten Strahlintensität von 0,20 mmA gestrahlt – außer der unter 30° Einstrahlwinkel -, welche aus anlagentechnischen Gründen mit 0,16 mmA beaufschlagt wurde.

Aus allen Messungen lässt sich eine deutliche Ausbildung der dem Verfestigungsstrahlen zuzuordnende oberflächennahe Druckeigenspannungseinbringung erkennen.

Dabei ergibt sich das Maximum der Druckeigenspannung für alle Einstrahlwinkel in einer offensichtlich vom Überdeckungsgrad abhängigen Tiefe unterhalb der Oberfläche mit einem leichten Abfall zur selbigen.

Die im unmittelbaren Oberflächenbereich von 0 bis ca. 150 μm gemessenen Eigenspannungen werden dabei im Folgenden nicht näher betrachtet, da diese auf

Grund des verwendeten Bohrlochverfahrens mit gewissen Unsicherheiten bzgl. der Messgenauigkeit belegt sind.

Den höchsten Wert der Druckeigenspannungsbeträge an der Oberfläche und im Betrag findet man sowohl für die mit 100 % und 1200 % Deckung unter 90° gestrahlten Proben wobei auch die unter 45° Einstrahlwinkel mit 1200 % Überdeckung bearbeitete Probe ein Eigenspannungsmaximum auf demselben Niveau ausbildet.

Bei 100 % Überdeckung liegt das Maximum des Eigenspannungsbetrags bei -760 MPa in einer Tiefe von 0,07 mm, während bei 1200 % Deckung die höchste gemessene Druckeigenspannung -700 MPa in einer Tiefe von 0,06 – 0,07 μm beträgt und dieses Maximum sowohl unter 90 und 45° Einstrahlwinkel erreicht wird.

In Richtung kleinerer Einstrahlwinkel fallen die Druckeigenspannungsbeträge kontinuierlich ab, und kommen bei 30° mit maximal -590 MPa für 100 % und -536 MPa für 1200 % Überdeckung zum Liegen.

Betrachtet man die Tiefe sowohl des Druckeigenspannungsmaximums als auch den Nulldurchgang, d.h. den Bereich in dem die Druck- in Zugeigenspannungen übergehen so zeigt sich deutlich, dass höhere Überdeckungsgrade auch tiefere Maxima und Nulldurchgänge erzeugen. Bei 100 % Deckung bildet sich das Druckeigenspannungsmaximum aller Einstrahlwinkelvarianten im Bereich von 0,06-0,08 mm aus und ist bei 1200 % Deckung um ca. 0,02 mm tiefer. Der Nulldurchgang liegt bei den Varianten mit 100 % Deckung bei ca. 0,4 mm und lässt sich aus den vorliegenden Daten für 1200 % Überdeckung bei ca. 0,5-0,6 mm schätzen.

Die zuvor dargestellten Tendenzen korrelieren vollständig mit dem in Kapitel 6 beschriebenen und in Abbildung 13 dargestellten theoretischen Ausführungen.

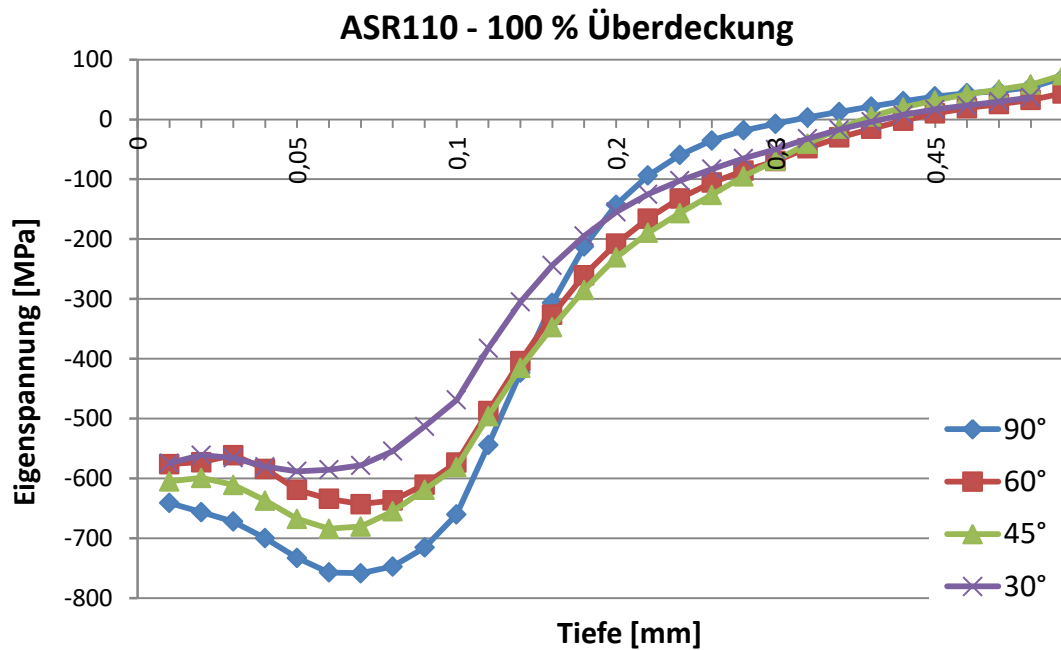


Abbildung 59: Eigenspannungsprofil der Wechselbiegeproben behandelt mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln bei 100 % Überdeckung

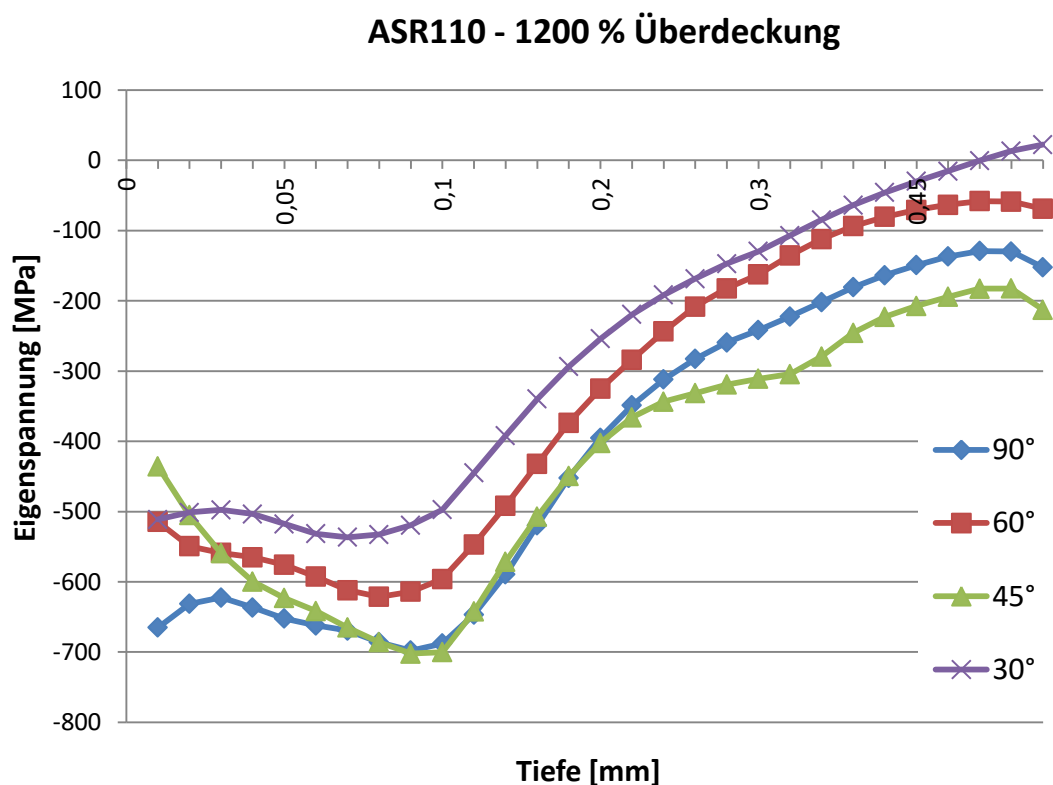


Abbildung 60: Eigenspannungsprofil der Wechselbiegeproben behandelt mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln bei 1200 % Überdeckung

Generell betrachtet liegen die DES Kurven innerhalb der jeweilig betrachteten Überdeckungsgrade recht nah beieinander. Das die Unterschiede der

Eigenspannungsverläufe bei den sehr unterschiedlichen Einstrahlwinkeln so gering ausfallen, darf durchaus mit der für jeden Einstrahlwinkel durchgeführten Anpassung der Strahlintensität in Zusammenhang gebracht werden. Hierdurch ergeben sich immer verwandte kinetische Energien des auftreffenden Strahlmittels mit entsprechend ähnlichen Antworten in Bezug auf die sich hieraus ergebende Druckeigenspannungsverteilung.

9.2.3. Lebensdauer

Die Ergebnisse der Wechselbiegeversuche sind in den folgenden Bildern (Abbildung 61 bis 66) durch die Wöhlerkurven dargestellt.

Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse der Wechselbiegeversuche mit 100 % und 1200 % Überdeckungsgrad für die Strahlenwinkel 90, 60, 45 und 30° sind in Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt. Die Intensitäten für 90, 60 und 45° betrugen hierbei jeweils 0,20 mmA, die Intensität für 30° Einstrahlwinkel fällt mit 0,16 mmA geringer aus.

Betrachtet man die Verläufe für 100 % und 1200 % Überdeckung jeweils isoliert voneinander, so zeigt sich zunächst, dass in allen Fällen die verfestigungsgestrahlten Ermüdungsproben oberhalb der nicht gestrahlten Probe, bezeichnet als „as machined“, mit einem Wert von 380 MPa bei 10^7 Lastwechseln zum Liegen kommen. Weiterhin ist bereits in dieser Darstellung eine Tendenz steigender Biegewechselstärken in Richtung flacherer Einstrahlwinkel als 90° erkennbar.

Bei den Varianten mit 100 % Deckung wird Wechselstärke für 90° Einstrahlwinkel bei 430 MPa erreicht und liegt damit ca. 13 % oberhalb der nicht gestrahlten Begleitprobe. Eine leicht geringere Wechselstärke ergibt sich für 60°, welche 420 MPa erreicht. Für 45° beträgt die Wechselstärke 450 MPa und eine nochmals leichte Verbesserung der Lebensdauer erkennt man bei 30° mit ermittelten 480 MPa, welche somit eine Steigerung von gut 23 % gegenüber der geschliffenen Referenzprobe erzielt.

Einen insgesamt höheren Anstieg der Wechselfestigkeit als bei 100 % Überdeckung verzeichnet die gleiche Versuchsreihe mit einer Deckung von 1200 %.

Hier erreicht die unter 90° gestrahlte Probe 500 MPa und liegt somit bereits 32 % höher als die geschliffene Referenz.

Die unter 60° gestrahlte Probe erreicht 520 MPa und die unter 45° weist den insgesamt höchsten Wert aller Vergleichsproben mit 570 MPa auf, was einer Steigerung um 50 % zur nicht gestrahlten Probe entspricht. Nur wenig darunter liegt die mit 30° – aber auch nur mit einer Intensität von 16 mmA – bearbeitete Probe mit 550 MPa, was für diese und die zuvor genannten, bei 1200 % Überdeckung gestrahlten Proben, einer Steigerung zur Referenz um 45 % gleichkommt.

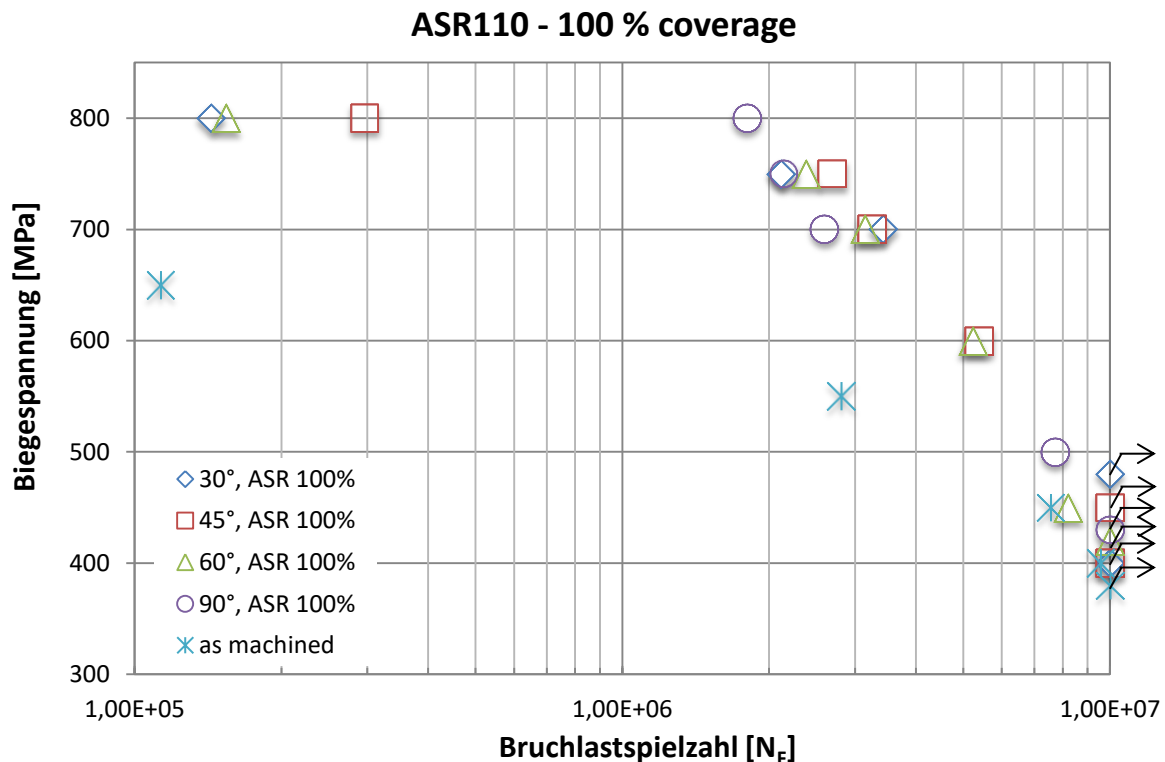


Abbildung 61: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für 100 % Überdeckungsgrad über verschiedene Einstrahlwinkel

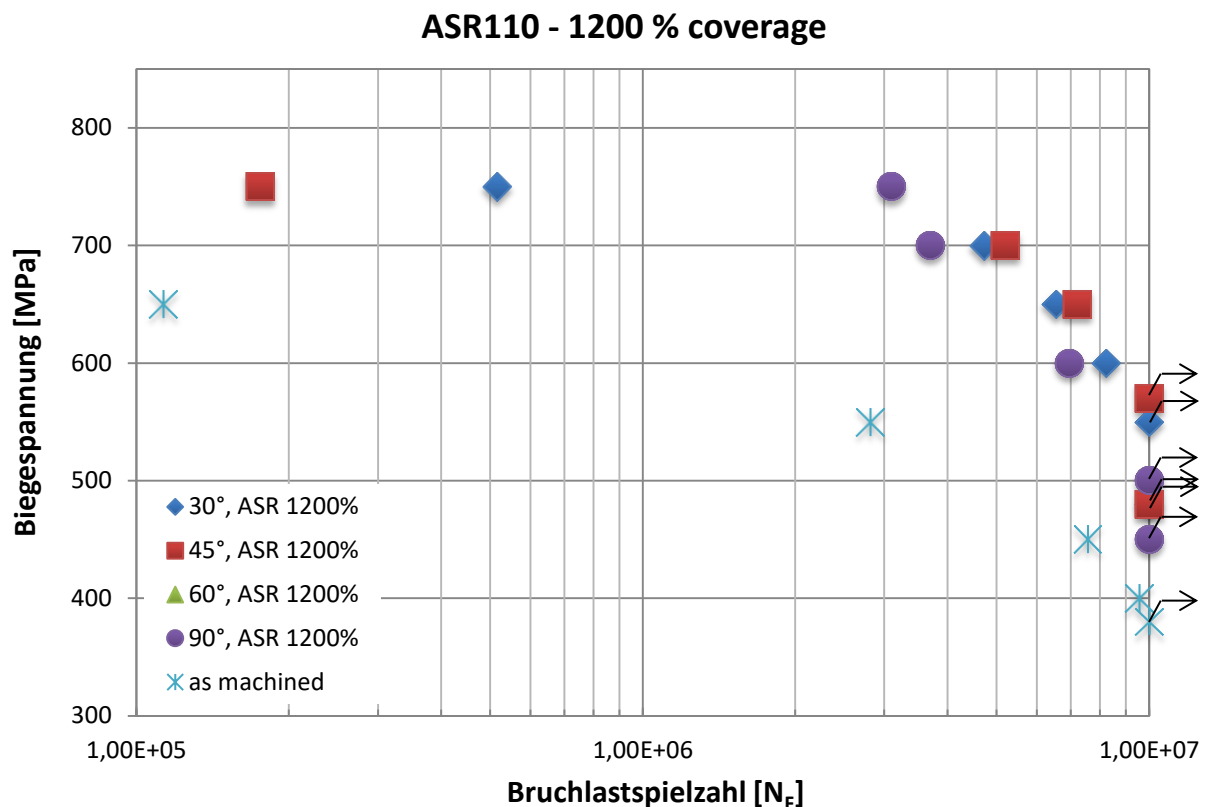


Abbildung 62: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für 1200 % Überdeckungsgrad über verschiedene Einstrahlwinkel

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 63 bis 64) sind die Wöhlerkurven mit 100 % und 1200 % Überdeckungsgrad bei jeweils gleichem Einstrahlwinkel vergleichend dargestellt.

In allen Fällen liegen die ermittelten Dauerfestigkeiten der verfestigungsgestrahlten Proben oberhalb der ebenfalls dargestellten nicht gestrahlten Referenzprobe.

Sehr ersichtlich wird in dieser Art der Darstellung die in allen untersuchten Fällen höhere erzielte Dauerfestigkeit bei den mit 1200 % Überdeckung gegenüber den mit 100 % gestrahlten Proben über alle Einstrahlwinkel hinweg.

Die größte Verbesserung der Lebensdauer innerhalb eines Einstrahlwinkels findet man bei 45° (Abbildung 65) mit einer Wechselfestigkeit von 570 MPa bei 1200 % Überdeckung. Der Einstrahlwinkel von 30° (Abbildung 66) zeigt ebenfalls eine deutliche Steigerung der Lebensdauer mit einer Wechselfestigkeit von 550 MPa obwohl oder eventuell auch weil hier die Strahlintensität mit 0,16 mmA 20 % unterhalb der weiteren untersuchten Einstrahlwinkel lag

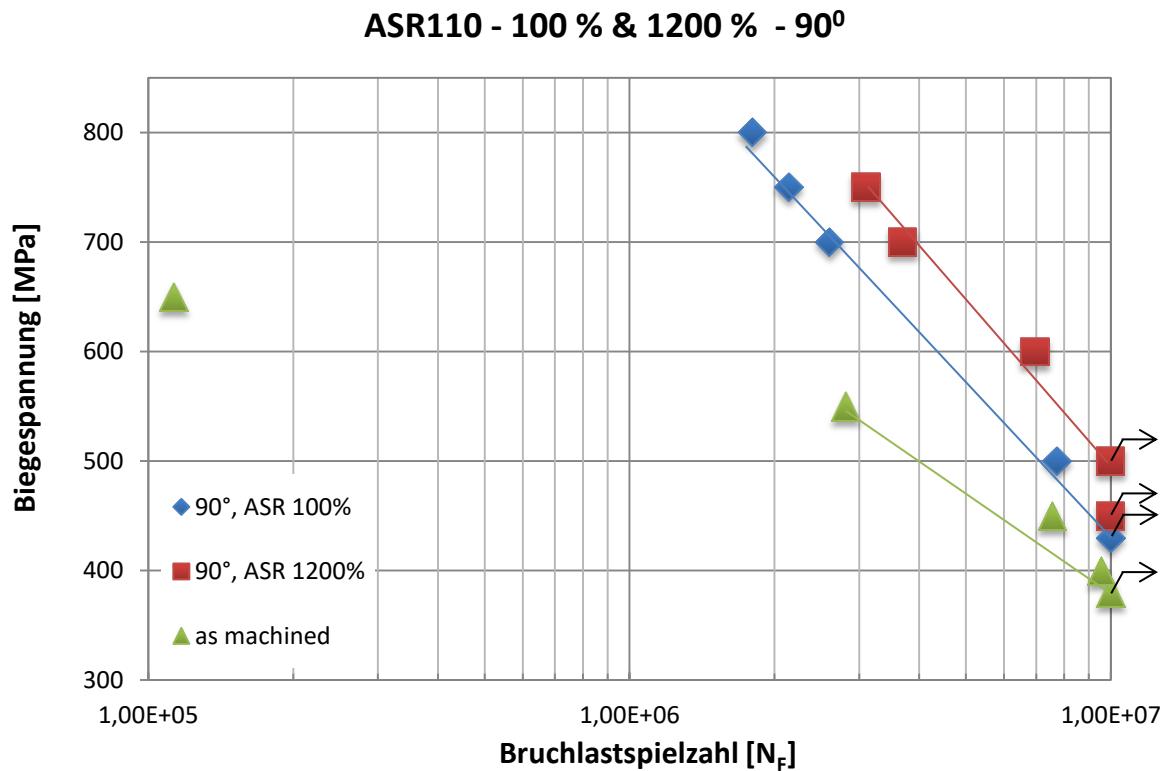


Abbildung 67: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 90° mit 100 und 1200 % Überdeckung

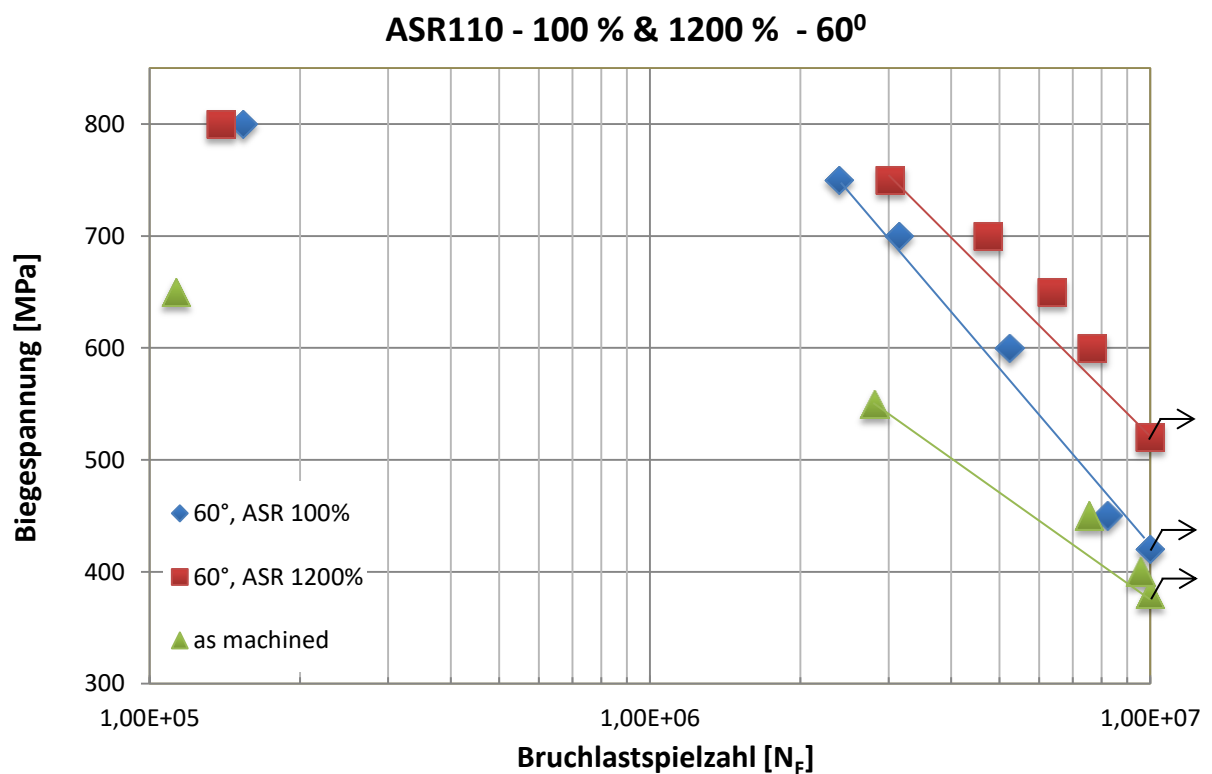


Abbildung 68: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 60° mit 100 und 1200 % Überdeckung

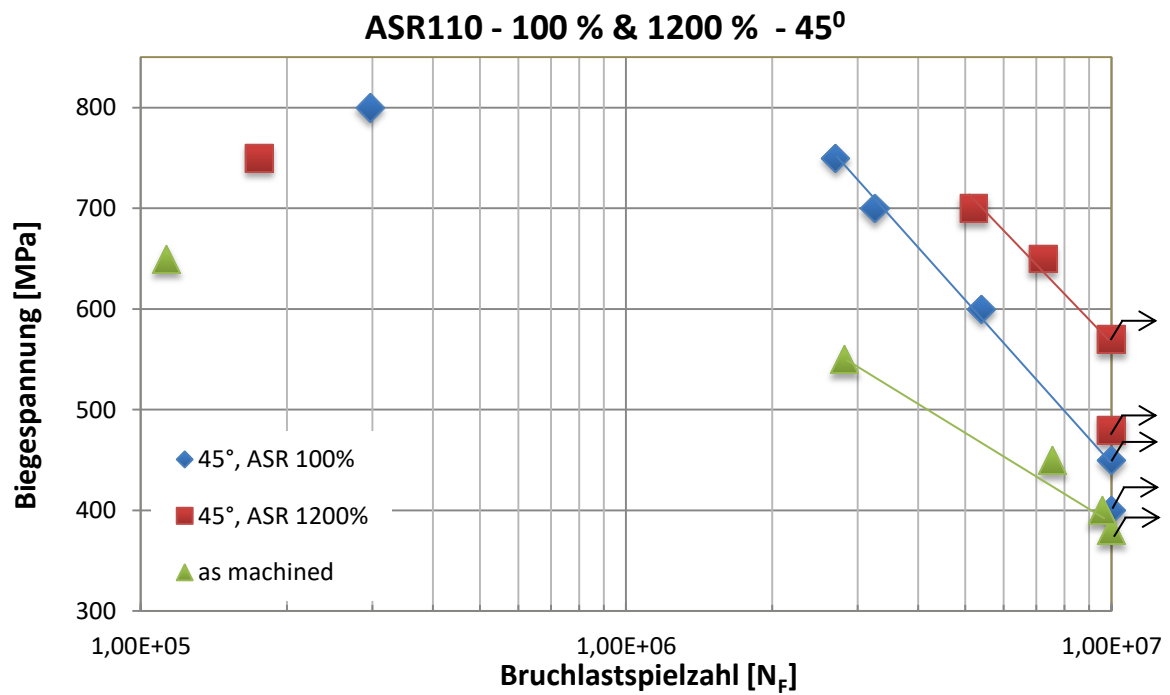


Abbildung 69: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 45° mit 100 und 1200 % Überdeckung

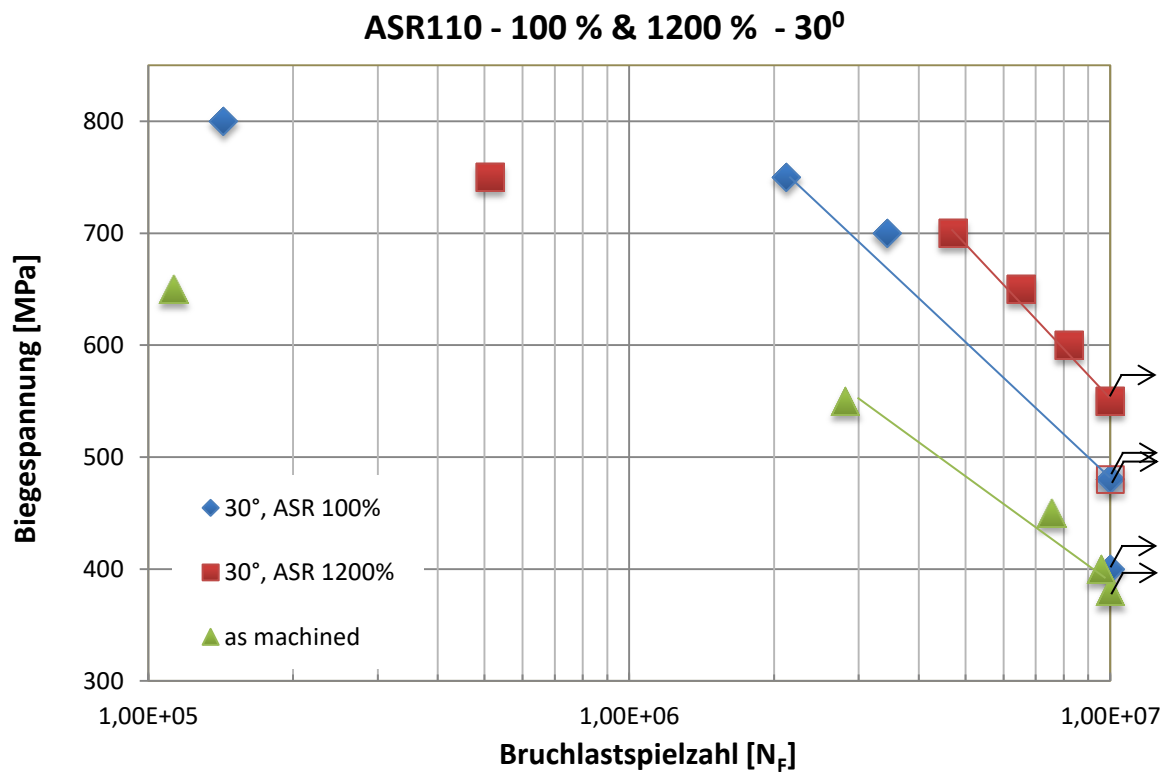


Abbildung 70: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für Einstrahlwinkel: 30° mit 100 und 1200 % Überdeckung

Zur weiteren Verdeutlichung der Ergebnisse sind in Abbildung 71 die jeweiligen Dauerfestigkeiten bei 10^7 Lastwechseln für den „as machined“ Zustand und den Überdeckungsgrad von 100 % und 1200 % über die jeweiligen Einstrahlwinkel aufgetragen.

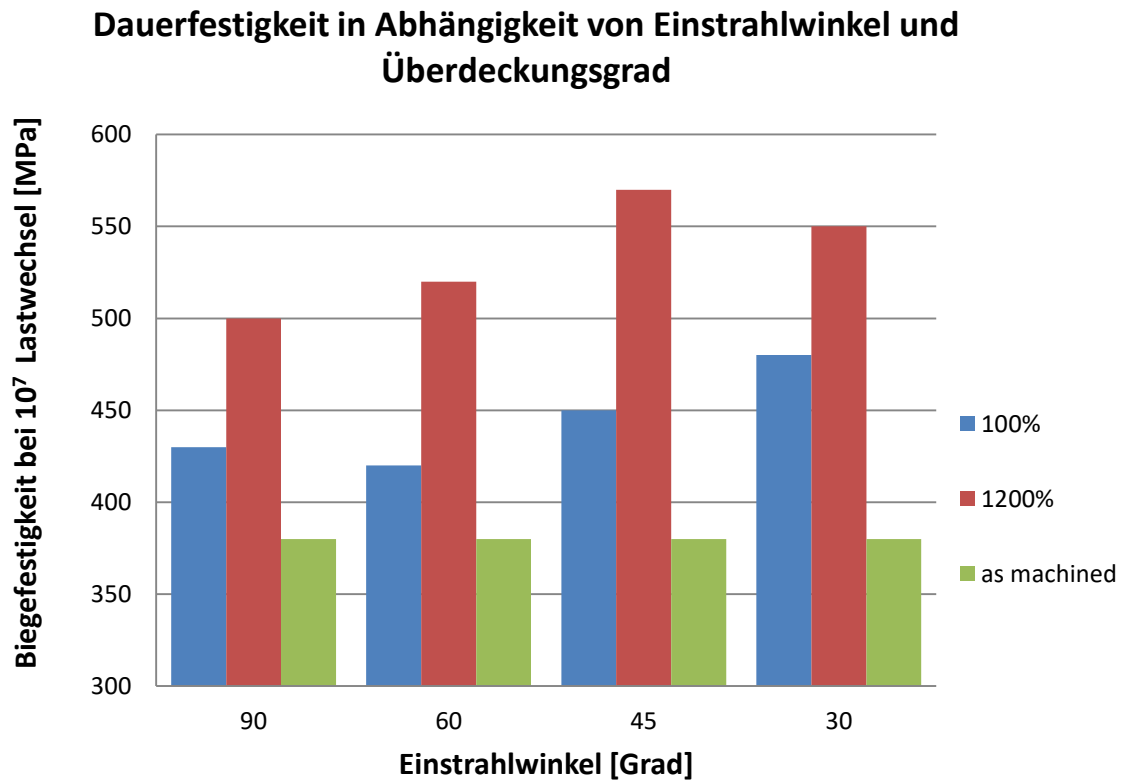


Abbildung 71: Übersicht der Dauerfestigkeiten der Wechselbiegeproben bei 10^7 Lastwechseln in Bezug auf den Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad

Auf den ersten Blick wird die über alle Einstrahlwinkel höchste Steigerung der Biegewechselspannungsfestigkeit bei 1200 % gefolgt von 100 % Überdeckung und schließlich dem nicht gestrahlten Referenzzustand deutlich.

Die höchste Wechselbiegefestigkeit tritt bei einem Einstrahlwinkel von 45° und einer Überdeckung von 1200 % auf. Im Gegensatz hierzu wird bei 100 % Überdeckung das Maximum bei einem Einstrahlwinkel von 30° erzielt.

Bei 30° Einstrahlwinkel zeigt sich bei 1200 % Überdeckung der zweithöchste Festigkeitswert, allerdings muss hierbei nochmals auf die in diesem Fall 20 % geringere Strahlintensität im Vergleich zu den anderen Einstrahlwinkeln hingewiesen werden.

Bei 90° Einstrahlwinkel zeigt die Probe mit 1200 % Überdeckung den geringsten Anstieg während sich selbiges Minimum bei 100 % Überdeckung bei 60° zeigt.

Insgesamt lässt das Balkendiagramm eine Tendenz der Steigerung der Biegegewecheigenschaften in Richtung flacherer Einstrahlwinkel bereits für 100 %, noch deutlicher aber für 1200 % Überdeckung bei konstanter Strahlintensität von 0,20 mA erkennen.

9.2.4. Mikroskopie

Die in Abbildung 72 dargestellten Schliffbilder zeigen die unter 90° (a) und 45° gestrahlten Wechselbiegeproben.

Hierbei ergibt sich bei der unter 90° Einstrahlwinkel behandelten Probe eine in der hier gewählten Vergrößerung relativ glatte Oberfläche, bei der sich einzelne Kugelabdrücke im Oberflächenbereich - wenn überhaupt - nur erahnen lassen.

Im Gegensatz hierzu zeigt die unter 45° bestrahlte Probe (b) vereinzelte, sich deutlich abzeichnende Erhöhungen, die mit der bereits in Abbildung 58 ersichtlichen und in Tabelle 10 gemessenen Welligkeit einhergehen.

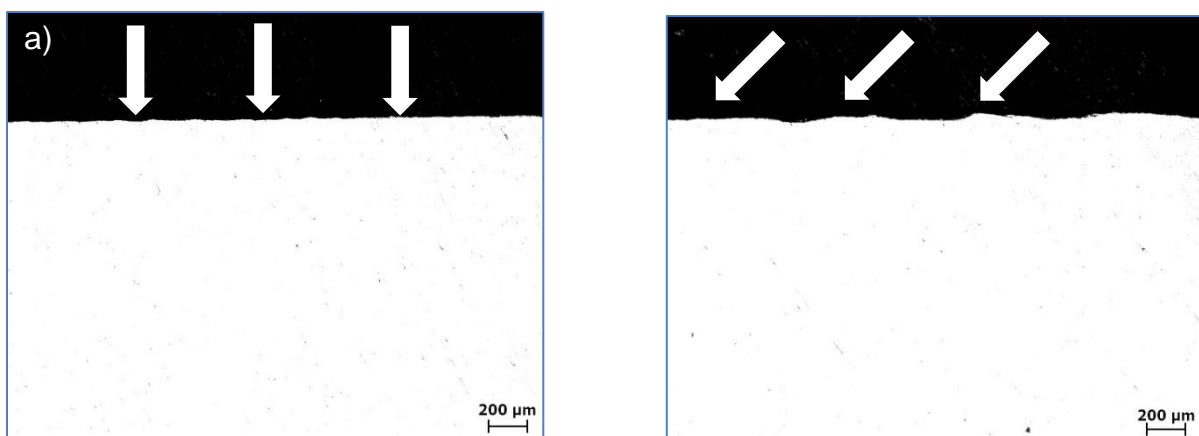


Abbildung 72: Querschliffe der unter (a) 90° und (b) 45° Einstrahlwinkel gestrahlten Wechselbiegeproben

Abbildung 73 zeigt weitere Schliffbilder der Wechselbiegeproben gestrahlt mit 90 und 45° Einstrahlwinkel bei einer zum einen höheren Vergrößerung als bei den Schliffen zuvor und der Bearbeitung der beim Präparieren freigelegten Oberflächen mittels Ätzen. Durch das Ätzen werden die in den unterschiedlichen Tiefenregionen ausgebildeten Gefügestrukturen des Ti-6Al-4V sichtbar gemacht.

Hierbei zeigt die in Abbildung (a) dargestellte unter 90° gestrahlte Probe ein unmittelbar an der Oberfläche gleichmäßig ausgebildetes feinkörnigeres Gefüge, was auf eine entsprechende Erhöhung der Versetzungsdichte, verursacht durch den Kugelstrahlprozess zurückzuführen ist.

Die unter 45° gestrahlte Probe gleicher Strahlintensität in Abbildung (b) resultiert hierbei in einem deutlichen, parallel zur Oberfläche deformiertem Gefüge mit in die Länge gezogenen, Blättertartig ausgeführten Strukturen.

Aus der gerichteten Textur des Gefüges als auch der wellenförmigen Ausbildung der Oberfläche lässt sich in diesem Fall deutlich die von rechts oben erfolgte Einstrahlrichtung unter 45° erkennen.

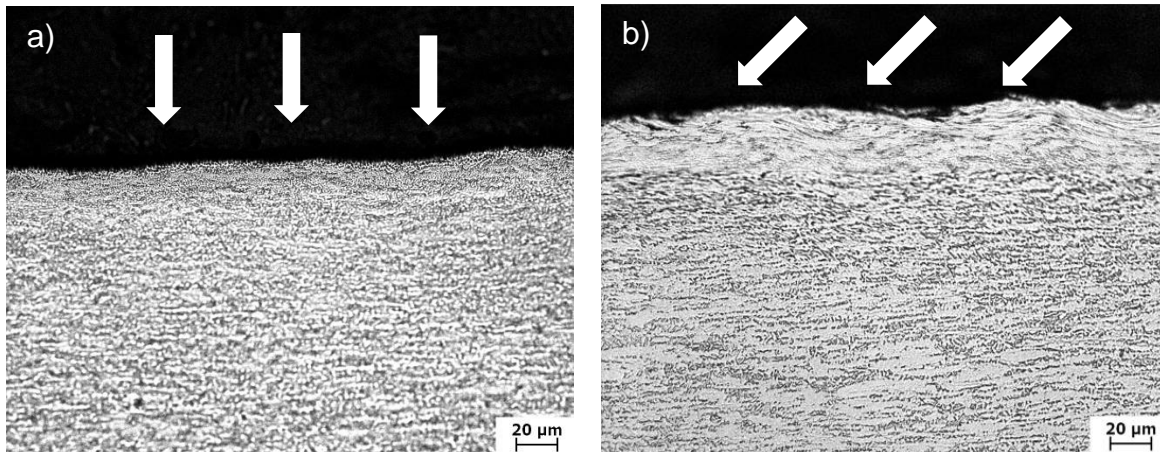


Abbildung 73: Schliffbilder mit sichtbarer Mikrostruktur der Wechselbiegeprobe mit einem Einstrahlwinkel von (a) 90° und (b) 45°

Ebenfalls erkennbar ist die größere Tiefenwirkung des Verfestigungsstrahls unter 45° im Vergleich zu 90° bei gleicher Strahlintensität von $0,20\ \text{mA}$.

Während der im Schliffbild durch das Verfestigungsstrahlen unter 90° erkennbar veränderte Bereich maximal bis in eine Tiefe von ca. $20\ \mu\text{m}$ reicht, sind dies unter 45° zumindest ca. $30\ \mu\text{m}$, womit sich eine um ca. 50 % erhöhte Einwirktiefe in Richtung des flacheren Einstrahlwinkels einstellt.

9.2.5. Rasterelektronenmikroskopie (REM)

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse einer mikroskopischen Bruchflächenanalyse der Wechselbiegeproben dargestellt. Hierbei wurden jeweils unter 45° Einstrahlwinkel behandelte Proben mit 100 % und 1200 % Deckung untersucht.

In allen Fällen erfolgt die Rissinitiierung unterhalb der verfestigungsgestrahlten Oberfläche.

Abbildung 74(a) zeigt die Rissinitiierung in der linken unteren Ecke unterhalb der Oberfläche und man sieht an der Struktur das langsame Wachsen des Risses über

die Anzahl der aufgetragenen Lastwechsel. Abbildung 74(b) zeigt dabei den im linken Bild mit einem roten Kreis versehenen Ausschnitt. Bei der hierdurch erkennbaren Struktur handelt es sich um die Bruchfläche des sich langsam ausbreitenden Risses, wie bereits in Abbildung 7 beschrieben wurde.

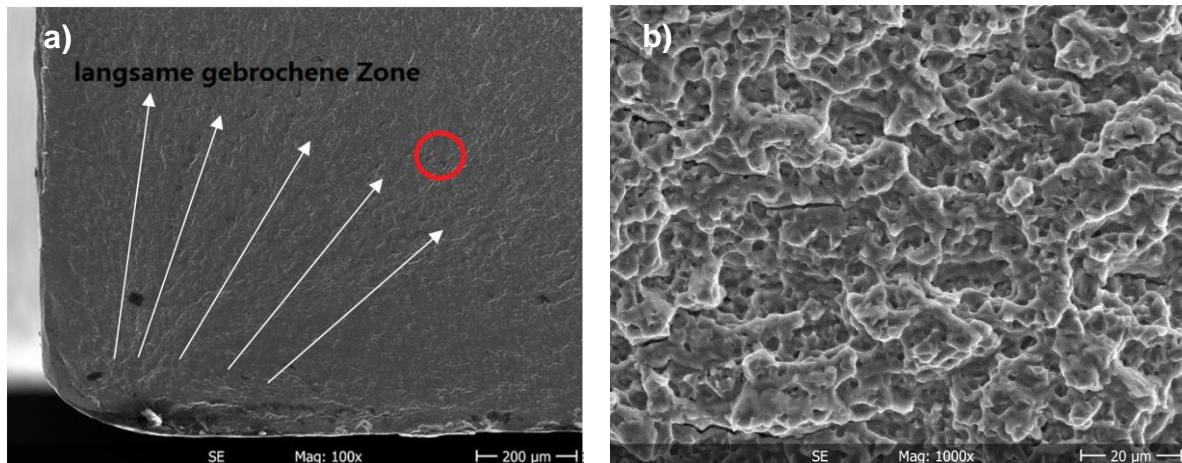


Abbildung 74: (a) REM 100 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt

Im Gegensatz hierzu zeigt Abbildung 75 das Bild der am Ende der Rissausbreitung gewaltsam und damit sehr schnell gebrochenen Zone.

Auch hier zeigt das mit b) auf der rechten Seite bezeichnete Bild die Vergrößerung des roten Punktes und gibt die für einen solchen Gewaltbruch typische Struktur wieder.

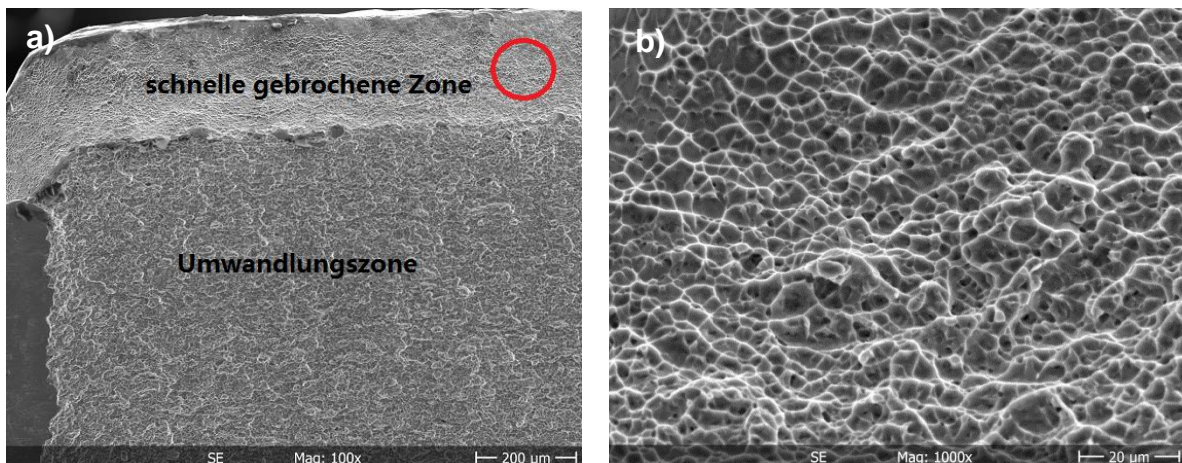


Abbildung 75: (a) REM 100 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt

Eine ähnliche Bruchflächenanalyse ist in der Abbildung 76 und Abbildung 77 dieses Mal für die mit 1200 % Überdeckung behandelten Proben gezeigt.

In Abbildung 76 sind hierbei die langsam und in Abbildung 77 die final schnell gebrochene Zone in der Übersicht und vergrößert dargestellt.

Wesentlicher Unterschied zu den mit 100 % Überdeckung gestrahlten Proben liegt bei der deutlich tiefer unter der Oberfläche liegenden Rissinitiierung bei einer Überdeckung mit 1200 %.

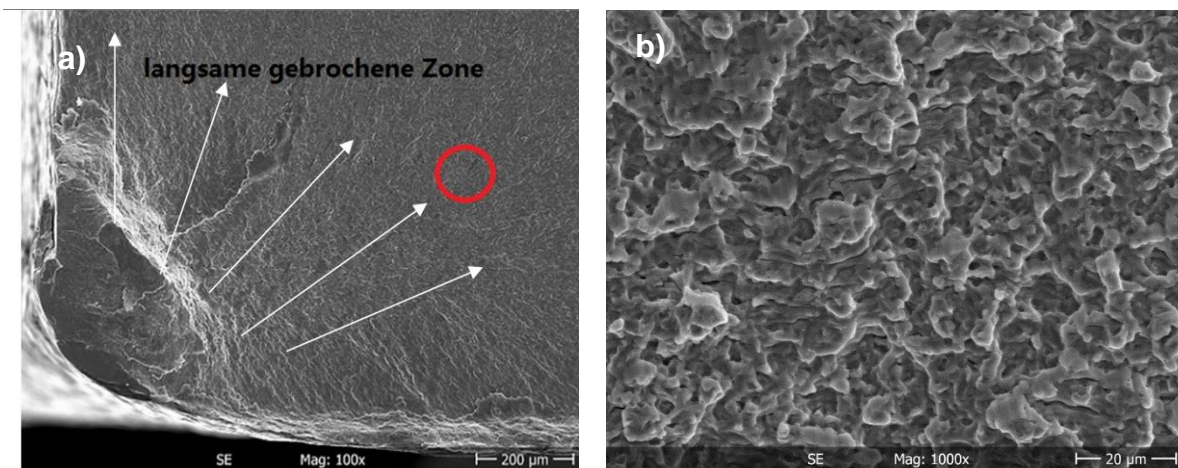


Abbildung 76: (a) REM 1200 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt

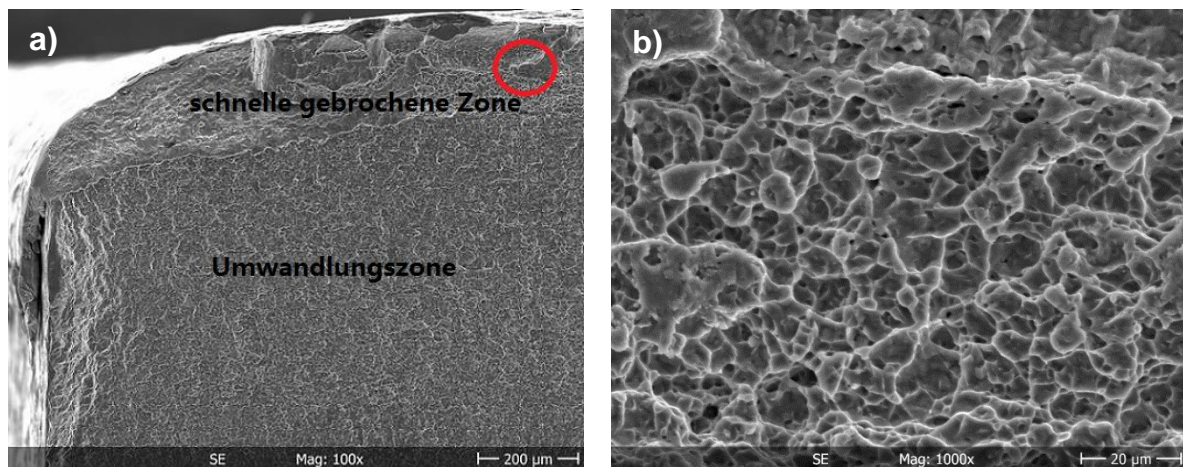


Abbildung 77: (a) REM 1200 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt

10. Diskussion der Ergebnisse

10.1. Überdeckungsgradversuche an Umlaufbiegeproben

10.1.1. Rauigkeit

Die Ergebnisse der Rauigkeitsuntersuchungen zeigen eine signifikante Erhöhung aller Rauigkeitskennwerte der gestrahlten Varianten sowohl gegenüber dem Zustand mit der geringsten gemessenen Rauigkeit EP als auch dem leicht erhöhten MP Zustand.

Je nach Betrachtung von arithmetischem Mittenrauwert (R_a), der Rautiefe (R_z) oder der maximalen Einzelrautiefe (R_{max}) ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse bei den angewendeten Strahlparametern.

Tendenziell führt die Verwendung des Strahlmittels SCCW14 sowohl bei 100 und 1200 % Überdeckung insbesondere bei R_{max} zu den höchsten gemessenen Rauigkeiten. Nicht zuletzt dürfte dies zum einen mit der höchsten Härte des verwendeten Strahlmittels als auch seiner im Vergleich zu den Gussstrahlmittel geringeren Rundheit im direkten Zusammenhang stehen.

Der Einfluss der Strahlmittelhärte mit der erzeugten Rauigkeit wird hierbei durch das verwendete ASH110 und dessen gemessenen Rauigkeiten, welche nur wenig unter denen des SCCW14 liegen gestützt. Sowohl das SCCW14 als auch das ASH110 haben eine deutlich höhere Härte als das ASR110 welches bei gleicher Intensität insbesondere bei 100 % Überdeckung zu deutlich geringeren Rauigkeitsmesswerten führt.

Eine weitere Auffälligkeit ist, dass bei dem relativ weichen ASR110 ein deutlicher Anstieg der Rauigkeit mit steigender Überdeckung zu verzeichnen ist. Bei den beiden härteren Strahlmitteltypen SCCW14 und ASH110 ist der Unterschied zwischen 100 und 1200 % Überdeckung deutlich geringer und zeigt beim ASH110 sogar abnehmende Tendenzen in Richtung höherer Überdeckung. Dieser Effekt der Einglättung mag insbesondere mit der hohen Überdeckung, der Härte und der Rundheit des hier verwendeten Gussstrahlmittels zusammenhängen.

Alle mit der geringen Überdeckung von 20 % gestrahlten Proben zeigen den geringsten Anstieg über alle Rauigkeitskennwerten hinweg und es zeigen sich auch

keine messbaren Unterschiede zwischen den 3 unterschiedlichen zu Anwendung gekommenen Strahlmitteltypen.

10.1.2. Eigenspannung

Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessung mit den beiden Strahlmitteltypen ASH110 und SCCW14 zeigen eine sehr ähnliche Ausbildung sowohl der oberflächennahen Eigenspannungen als auch dem Betrag und der Tiefe des Eigenspannungsmaximums und der Einwirktiefe.

Betragsmäßig gering aber tendenziell durchgängig zeigte hierbei das Gussstrahlmittel ASH110 etwas höhere und tiefere Eigenspannungswerte als das verwendete SCCW14.

10.1.3. Lebensdauer

Klar nachgewiesen werden konnte über alle verwendeten Strahlmitteltypen und Überdeckungen $\geq 100\%$ hinweg die steigernde Wirkung des Verfestigungsstrahlens auf die Biegegewchselfestigkeit von dem in dieser Arbeit verwendeten Ti-6Al-4V.

in der Übersicht der Ergebnisse zeigte das härteste in dieser Arbeit verwendete Strahlmittel SCCW14 sowohl bei 100 und 1200 % die höchsten Steigerungsraten gegenüber dem EP Zustand.

Nicht ganz so durchgängig sind diese Ergebnisse bei den beiden verwendeten Gussstrahlmitteln, wobei auch hier höhere Verbesserung der Biegegewchselfestigkeit dem härteren ASH110 zugeordnet werden können.

Bemerkenswert ist diese steigende Tendenz in Richtung härterer Strahlmittel insofern, als diese – insbesondere beim SCCW14 – gleichzeitig die höchsten Rauigkeiten, welche der Biegegewchselfestigkeit eher abträglich sind, aufwiesen.

Die Lebensdauer steigernde Wirkung des Verfestigungsstrahlens darf, bei den vorliegenden Versuchsparametern, sowohl den eingebrachten Druckeigenspannungen als auch der Erhöhung der oberflächennahen Versetzungsdichte zugeordnet werden.

Da die Ergebnisse der Druckeigenspannungsmessungen, über alle Parameter hinweg, auf sehr ähnlichem Niveau liegen, muss man den ausschlaggebenden Effekt für die unterschiedliche Steigerung der Biegegewchselfestigkeiten vermutlich der bei

dem SCCW14 höchsten Härte und den hieraus resultierenden höheren plastischen Deformationen der Randschicht und damit einhergehenden Versetzungsdichten zuordnen, welche sich auch in einer höheren Rauigkeit der gestrahlten Oberfläche widerspiegelt.

Wie kritisch sich Überdeckungen deutlich unter 100 % auf die Lebensdauer des hier verwendeten Ti-6Al-4V auswirken konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Bei nahezu allen Versuchen mit 20 % Überdeckung wurde die Biegegeweche selbstfestigkeit gegenüber dem EP Zustand signifikant reduziert.

Wie schon zuvor bei den hohen Überdeckungen von 100 und 1200 % zeigt sich hier eine Tendenz in Verbindung mit der Strahlmittelhärte.

Während die mit dem härtesten Strahlmittel SCCW14 gestrahlten Proben bei 20 % Überdeckung noch das gleiche Dauerfestigkeitsniveau bei 10^7 Lastwechsel wie der EP Zustand bewirkte der Einfluss des weichsten Strahlmittels (ASR110) den deutlichsten Abfall. Das ebenfalls relativ harte ASH110 kam zwischen den beiden zuvor genannten Strahlmitteltypen zum Liegen.

Zuvor genannter Zusammenhang der Lebensdauer zur Strahlmittelhärte ist insofern bemerkenswert, als man davon ausgeht, dass die bei geringer Überdeckung einzeln liegenden Kalotteneinschläge als lokale Rissinitiierungen fungieren. Obwohl das eckigere SCCW Strahlmittel einen Eindruck in der Materialoberfläche hinterlässt, in dem unter Beanspruchung höhere Spannungskonzentrationen auftreten können, scheint eventuell dessen hohe Härte auch bei singulären Einschlägen noch eine stärker kompensierende, die Lebensdauer positiv beeinflussende Wirkung zu haben. Diese These wird, zumindest in dem hier vorliegenden Fall, durch die geringer ausfallenden Steigerungen der Dauerfestigkeit bei Verwendung der beiden unterschiedlich harten Gussstrahlmittel untermauert.

10.2. Einstrahlwinkelversuche an Wechselbiegeproben

10.2.1. Rauigkeit/Welligkeit

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Rauigkeit zeigen, dass alle Variationen der Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrade die Oberflächenrauigkeit gegenüber der „as machined“ Referenzprobe deutlich erhöhen.

Am geringsten fällt der Anstieg der Rauigkeit bei der unter 90° und mit 1200 % gestrahlten Varianten aus, die zusätzlich eine geringere Rauigkeit aufwies als die mit demselben Einstrahlwinkel unter 100 % Überdeckung gestrahlte Probe. Selbiges machte sich optisch auch in ein höheres Reflexionsvermögen als bei allen anderen gestrahlten Proben bemerkbar.

Als Begründung hierfür dürfte der bereits zuvor beschriebene Einglättungseffekt bei 90° Einstrahlwinkel gelten.

Bei den Auftreffwinkeln $< 90^\circ$ wird das Material mit steigender Überdeckung und flacheren Winkeln immer stärker durch die Kugeleinschläge deformiert und getrieben, so dass sich hieraus eine höhere Rauigkeit und Welligkeit ergibt.

Eine einheitliche Tendenz lässt hierbei sowohl innerhalb der einzelnen Rauigkeitskenngrößen als auch deren Vergleich untereinander nicht erkennen.

Tendenziell liegt die Rauigkeit R_{\max} der unter 30° und 1200 % Überdeckung gestrahlten Probe am höchsten obwohl diese mit der maschinentechnisch maximal erreichbaren Strahlintensität von 16 mmA noch 20 % unter der Strahlintensität von 0,20 mmA aller anderen Proben lag. Diese Tatsache lässt vermuten, dass bei entsprechend höherer Intensität die Rauigkeit und der Effekt des Treibens des Materials in Strahlrichtung und damit die Welligkeit tatsächlich noch höher ausfallen würde. Die unter 45° Einstrahlwinkel festgestellte maximale Welligkeit aller Proben sollte somit von der 30° Version mit 20 mmA noch übertroffen werden.

10.2.2. Eigenspannungen

Die Messung der Eigenspannungstiefenverläufe belegt die Erfahrung, dass höhere Überdeckungsgrade – in diesem Fall 1200 % gegenüber 100 % - auch zu tieferen Druckeigenspannungen führen. Dieser Sachverhalt bezieht sich sowohl auf die Lage der Eigenspannungsmaxima als auch den Nulldurchgang über alle Einstrahlwinkel hinweg.

Geringere Druckeigenspannungswerte als mit 100 % Überdeckung zeigen nur die mit 1200 % Überdeckung und $< 90^\circ$ gestrahlten Proben im oberflächennahen Bereich, was mit dem Effekt der höheren Rauigkeit einhergehen dürfte. Diese Tendenz ist bekannt, vorliegende Messdaten müssen auf Basis der verwendeten Bohrlochmethode aber mit Vorsicht gehandhabt werden, da mit der Bohrlochmethode die randschichtnahen Bereiche nur relativ ungenau vermessen werden können.

Jeweils innerhalb der beiden untersuchten Überdeckungsgrade weist die unter 30° Einstrahlwinkel gestrahlte Variante den geringsten, die unter 90° den höchsten Eigenspannungstiefenverlauf zumindest bis nach dem Maximum auf.

Insbesondere bei 1200 % Überdeckung scheint sich die Lage der Eigenspannungsmaxima mit größeren Einstrahlwinkeln in tiefere Regionen zu verschieben, so dass sich die tiefsten Lagen bei 90° und die am nächsten zur Oberfläche gelegene Lage des Eigenspannungsmaximums bei 30° Einstrahlwinkel einstellt.

10.2.3. Lebensdauer

Die allgemeine Wechselfestigkeit der nicht gestrahlten Referenzprobe wurde mit 380 MPa bei 10^7 Lastwechseln ermittelt.

Wie zu erwarten zeigten alle verfestigungsgestrahlten Varianten gleich welcher Überdeckung oder Einstrahlwinkel Steigerungen der Dauerfestigkeit von 13 % bis 50 %.

Die höchste Steigerung zeigte hierbei die Probe die mit 45° Einstrahlwinkel bei konstanter Strahlintensität von 0,20 mmA gestrahlt wurde. Die hierbei erzielte Steigerung der Dauerfestigkeit war größer als die, die bei 90° Einstrahlwinkel erreicht wurde.

Das die höchsten Biegezugfestigkeiten mit 45° Einstrahlwinkel und 1200 % Deckung mit den größten Rauigkeiten und Welligkeiten einhergehen kann mit den gleichzeitig erzeugten tiefsten Eigenspannungen und der hieraus resultierenden im REM ausgemachten tiefen Lage der Rissinitiierung zusammen hängen. Leistungssteigernd hinzu kommt eine durch den flachen Einstrahlwinkel herrührende deutlich Erhöhung der oberflächennahen Versetzungen, welche die Rissausbreitung nochmals deutlich verzögern.

In dieser Arbeit zwar nicht näher untersucht, aber sehr wahrscheinlich mit für die Lebensdauer ausschlaggebend, ist die mit flacherem Einstrahlwinkel zunehmende, dem Auftreffwinkel folgende gerichtete Deformation der Mikrostruktur im oberflächennahen Bereich (siehe auch 6.2.4). Diese Umformung schmiegt sich parallel zur Werkstückoberfläche an und bildet damit Verformungsstrukturen die rechtwinklig zur bevorzugten Rissausbreitungsrichtung stehen und somit neben der erhöhten Versetzungsdichte und der Druckeigenspannung ebenfalls eine Verzögerung auf die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ausüben.

Die signifikant erhöhten Rauigkeiten und sichtbaren Welligkeiten üben dabei eine sicher negative Beeinflussung auf die Lebensdauer aus, deren Effekt wird aber durch die hohen und tiefen Druckeigenspannungen und die einhergehende Erhöhung und Ausformung der Versetzungsdichte überkompensiert.

Unterstützt wird diese These durch eine sich in Richtung flacherer Einstrahlwinkel fortpflanzende Tendenz, wobei der Einstrahlwinkel von 30° wegen seiner abweichend geringeren Strahlintensität gesondert betrachtet werden muss.

11. Zusammenfassung

Alle mit unterschiedlichen Strahlmitteln, Einstrahlwinkeln und Überdeckungsgrad durchgeführten Untersuchungen an Umlauf- und Wechselbiegeproben haben den lebensdauererhöhenden Effekt einer kontrollierten Verfestigungsstrahlbehandlung bei Überdeckungen $\geq 100\%$ nachgewiesen.

Dabei wurde gezeigt, dass insbesondere harte Strahlmittel mit sehr hohen Überdeckungen zu tendenziell höheren Festigkeitssteigerungen bei Ti-6Al-4V führen. Mit diesen harten Strahlmitteln und Überdeckungen einhergehende höhere Rauigkeiten spielten bei den in dieser Arbeit verwendeten Strahlparametern keine dauerfestigkeitsreduzierende Rolle.

Bezüglich des Einstrahlwinkels konnten selbst bei sehr flachen und in einer industriell orientierten Strahlbehandlung an den Wechselbiegeproben eher unüblichen bzw. zu vermeidenden Konfigurationen besonders signifikante Steigerungen der Dauerbiegewechselfestigkeit nachgewiesen werden.

Zusätzlich zeigte sich hierbei, wie schon bei den Überdeckungsgraduntersuchungen an den Umlaufbiegeproben, die Tendenz der Steigerung in Richtung höherer Überdeckungsgrade.

Besonders bemerkenswert sind die ermittelten Biegewechselfestigkeiten mit einem Maximum beim Einstrahlwinkel von 45° , welcher bei den meisten Kugelstrahlvorschriften bereits einen Grenzwert darstellt.

Trotz deutlich sichtbarer Folgen in Form von Welligkeiten an der gestrahlten Oberfläche zeigten die so behandelten Proben bei 1200 % Überdeckung die über alle untersuchten Konfigurationen hinweg höchsten Biegewechselfestigkeiten gefolgt von dem noch flacheren Einstrahlwinkel von 30° .

Da die bei gleicher Intensität und 1200 % Überdeckung unter 90° gestrahlten Wechselbiegeproben den geringsten Anstieg der Wechselfestigkeit gegenüber dem „as machined“ Zustand zeigten, muss wie schon bei den Umlaufbiegeproben, in direkten Zusammenhang mit dem Einfluss der strahltechnisch resultierenden Tiefe

der DES, der Versetzungsdichte und eventuell auch der erzeugten Textur im oberflächennahen Bereich auf die Lebensdauer gebracht werden.

Alle zuvor genannten Einflussgrößen werden mit der Tendenz zu flacheren Einstrahlwinkeln höher und nehmen damit Einfluss auf die Wechselfestigkeit.

Insbesondere die unter flachen Einstrahlwinkeln deutlich ausgeprägte oberflächennahe Textur mag hier einen erhöhten Widerstand auf das Rißwachstum ausüben, was aber in an diese Arbeit anschließenden Versuchen genauer untersucht werden müsste.

Nahezu keinen Einfluss auf die Lebensdauer nimmt bei den untersuchten Wechselbiegeproben die deutlich veränderte Oberflächentopographie (Welligkeit) und Rauigkeit.

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: (a) aufgeschnittene Trommel aus der Turbine eines Strahltriebwerks aus Ti-6Al-4V (b) alphabetisch bezeichnete Almenstreifenpositionen/Strahlbereiche	3
Abbildung 2: Gitterstrukturen der hexagonal dichtest gepackten α - und der kubisch raumzentrierten β -Phase [16]	6
Abbildung 3: Legierungsklassen in Abhängigkeit vom Aluminium Anteil im Titan inkl. der Zuordnung von Ti-6Al-4V [17]	7
Abbildung 4: Materialmix moderner Flugzeuge [18]	8
Abbildung 5: Anteil von Werkstoffen am Strukturgewicht moderner Triebwerke [16]	9
Abbildung 6: Verschiedene Phasen der Gesamtlebensdauer in Bezug auf Risse	11
Abbildung 7: Makroskopisches Aussehen eines Ermüdungsbruchs (a) schematisch (b) Realbeispiel [22]	12
Abbildung 8: Wöhlerdiagramm	14
Abbildung 9: Smith-Diagramm: Bei gleicher Lastmittelspannung σ_m Steigerung der Dauerfestigkeit infolge Mittelspannungsverschiebung $\Delta\sigma_m$, Randfestigkeitssteigerungseffekt $\Delta\sigma_I$ [39]	17
Abbildung 10: (a) Eigenspannungsprofil (schematisch) mit Darstellung Rissinitiiierung (X) (b) Rissinitiiierung unterhalb der Oberfläche einer verfestigungsgestrahlten Probe [47]	20
Abbildung 11: Darstellung der durch eine PC basierte Software (PEENSTRESS – Fa. METAL IMPROVEMENT COMPANY) berechneten Zug- und Druckeigenspannungen von mit gleichen Kugelstrahlparametern behandelten Bauteilen unterschiedlichem Querschnitts (a) 1,5 mm (b) 6 mm	21
Abbildung 12: Schematische Beschreibung der Elementarprozesse beim Verfestigungsstrahlen [61]	25

Abbildung 13: Auswirkung von Werkstoff- und Verfahrensparametervariationen auf die Ausbildung von Kugelstrahleigenspannungen [62]	26
Abbildung 14: Vom Verfestigungsstrahlen beeinflusste charakteristische Randschichteigenschaften [66]	26
Abbildung 15: Almenstreifen zur Intensitätsmessung [65]	28
Abbildung 16: Sättigungskurve zur Intensitätsermittlung	29
Abbildung 17: Beispiel einer Sättigungskurve erzeugt mittels Saturation Curve Solver Software (Firma Shockform)	30
Abbildung 18: Variationsparameter beim Verfestigungsstrahlen und Definition der Intensität [70].....	30
Abbildung 19: Aufteilung der Strahlmittelgeschwindigkeit in senkrechte und parallele Kräfte in Bezug zur Oberfläche	32
Abbildung 20: Elliptisch geformter Kugelabdruck von ASR170 Strahlmittel [79].....	32
Abbildung 21: Einfluss des Einstrahlwinkels auf die relative Strahlintensität in Almen	33
Abbildung 22: Metallographische Querschliffpreparation und Lichtmikroskopie eines Stahls (C80) im normalisierten Zustand mit perlitischem Gefüge; (a) nicht gestrahlte Oberfläche (b) unter 45° Einstrahlwinkel verfestigungsgestrahlte Oberfläche [80]	34
Abbildung 23: Oberfläche eines unter 45° Einstrahlwinkel mit ASR110 verfestigungsgestrahltem Almenstreifens mit einer Strahlzeit von 40 s und einem Druck von 7,5 bar	34
Abbildung 24: Mikrographie der globularen Struktur des für den ersten Teil der Untersuchungen verwendeten Ti-6Al-4V.....	35
Abbildung 25: Mikrographie des ursprünglichen (a) und nachgelieferten (b) Ti- 6Al-4V, für die mit 1200 % Deckung verwendeten Umlaufbiegeproben	36
Abbildung 26: Vergrößerung (200x) der Strahlmittel (a) SCCW14 (b) ASR110 (c) ASH110.....	37
Abbildung 27: Bildung des arithmetischen Mittenrauwert R_a [83]	39
Abbildung 28: Definition der Rautiefe R_z , der maximalen Einzelrautiefe R_{max} und der Rautiefe R_t [83]	39
Abbildung 29: Ableitung der Wellentiefe W_t [83]	40

Abbildung 48: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SSCW14 mit 20 % und 100 % Deckung verfestigungsgestrahlt Zustand	62
Abbildung 49: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SSCW14 mit 100 % Deckung verfestigungsgestrahlt Zustand	63
Abbildung 50: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SSCW14 mit 20 % Deckung verfestigungsgestrahlt Zustand	64
Abbildung 51: Wöhlerkurven der Umlaufbiegeproben im EP und mit ASR110, ASH110 und SSCW14 mit 1200 % Deckung verfestigungsgestrahlt Zustand	65
Abbildung 52: Übersicht der Oberflächenstruktur der Umlaufbiegeproben verfestigungsgestrahlt mit ASR110, ASH110 und SCCW14, Überdeckungsgraden von 20 %, 100 % und 1200 % bei einer Vergrößerung von 1x, 100x und 200x	68
Abbildung 53: Rissbildungsort nach dem Verfestigungsstrahlen (ASH110, 20 % Überdeckung).....	69
Abbildung 54: Übersicht der Rauigkeiten an den Wechselbiegeproben im „as machined“ Zustand und bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90 Grad mit 100 % und 1200 % Überdeckung	71
Abbildung 55: Mikroskopie für 100 % Überdeckungsgrad bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90°.....	73
Abbildung 56: Mikroskopie für 1200 % Überdeckungsgrad bei den Einstrahlwinkeln von 30, 45, 60 und 90°.....	74
Abbildung 57: Eigenspannungsprofil der Wechselbiegeproben behandelt mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln bei 100 % Überdeckung.....	77
Abbildung 58: Eigenspannungsprofil der Wechselbiegeproben behandelt mit unterschiedlichen Einstrahlwinkeln bei 1200 % Überdeckung.....	77
Abbildung 59: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für 100 % Überdeckungsgrad über verschiedene Einstrahlwinkel	79
Abbildung 60: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für 1200 % Überdeckungsgrad über verschiedene Einstrahlwinkel	80

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 61 bis 62) sind die Wöhlerkurven mit 100 % und 1200 % Überdeckungsgrad bei jeweils gleichem Einstrahlwinkel vergleichend dargestellt.....	80
Abbildung 63: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 90° mit 100 und 1200 % Überdeckung	81
Abbildung 64: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 60° mit 100 und 1200 % Überdeckung	81
Abbildung 65: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe beim Einstrahlwinkel: 45° mit 100 und 1200 % Überdeckung	82
Abbildung 66: Wöhlerkurve der Wechselbiegeprobe für Einstrahlwinkel: 30° mit 100 und 1200 % Überdeckung	82
Abbildung 67: Übersicht der Dauerfestigkeiten der Wechselbiegeproben bei 10 ⁷ Lastwechseln in Bezug auf den Einstrahlwinkel und Überdeckungsgrad	83
Abbildung 68: Querschliffe der unter (a) 90° und (b) 45° Einstrahlwinkel gestrahlten Wechselbiegeproben	84
Abbildung 69: Schliffbilder mit sichtbarer Mikrostruktur der Wechselbiegeprobe mit eine einem Einstrahlwinkel von (a) 90° und (b) 45°	85
Abbildung 70: (a) REM 100 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt.....	86
Abbildung 71: (a) REM 100 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt.....	86
Abbildung 72: (a) REM 1200 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt.....	87
Abbildung 73: (a) REM 1200 % Überdeckung, 45° Einstrahlwinkel (b) Vergrößerung roter Punkt.....	87

13. Literaturverzeichnis

- [1] Champaigne, J., *History of Shot Peening Specifications*, Marne la Vallee, France: ICSP9.
- [2] BOEING Aircraft Cooperation, *BAC 5730 Shot Peening*, 2011.
- [3] AIRBUS S.A.S., *Shot peening for fatigue enhancement of metal parts*, Blagnac, France, 2010.
- [4] SAE International, *J443 - Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Strip*, 2010.
- [5] SAE International, *J2277 - Shot Peening Coverage Determination*, 2009.
- [6] Rolls-Royce, *RPS428 - Controlled Shot Peening*, 2010.
- [7] Meguid, S.A., *Effect Of Incomplete Coverage Upon The Fatigue Fracture Performance Of Peened Components*, University of Toronto, Dept of Mechanical Engr, 1990.
- [8] S. Meguid, „Effect Of Partial-coverage Upon The Fatigue Fracture Behaviour Of Peened Components,“ *Fat.Fract.Engrg.Mater.Struc.Vol.14,No.5,p.515,GB*, 1991.
- [9] T. Ludian, *Oberflächeneigenschaften und Ermüdungsverhalten ausgewählter Aluminium- und Titanlegierungen nach Variation des Überdeckungsgrades beim Verfestigungsstrahlen*, Technische Universität Clausthal, 2000.
- [10] H. Diep, H. Bae, M. Ramulu, „Manual shot peening intensity and coverage effects on fatigue performance of aluminum alloy,“ *ICSP-11 South Bend, IN, USA*, 2011.
- [11] Clarke, D. and Birley, S.S., Paris, France: *Conf Proc: ICSP-1*, (p.167-174), 1981.
- [12] Wagner, L., Lutjering, G, *Influence Of The Shot Peening Parameters On The Surface Layer Properties And Fat. Life Of Ti-6Al-4V*, *Conf Proc: ICSP-2*, (p.194-200), 1984.
- [13] Dorr, Hilpert, Beckmerhagen, Kiefer, Wagner, „Influence of Shot Peening on Fatigue Performance of High-Strength Aluminum - and Magnesium Alloys,“ *Conf Proc: ICSP-7* (pg 153-160), 1999.

-
- [14] L. Wagner, M. Wollmann, „Shot Peening of Non-ferrous Alloys to Enhance Fatigue Performance,“ Tokyo, 2008.
- [15] W. Kroll, „Method for manufacturing titanium“. USA Patent US2205854, 6 Juli 1938.
- [16] M. Peters, C. Leyens, Titan und Titanlegierungen, Köln: DLR, 2002.
- [17] M. Wollmann, L. Wagner, *DGM Fortbildungsseminar Titan und Titanlegierungen - Ermüdung von Titanlegierungen*, Köln: DGM, 2015.
- [18] AIRBUS S.A.S., „unbekannt,“ [Online].
- [19] L. Wagner, *Dissertation*, Ruhr-Universität Bochum, 1981.
- [20] E. Hornbogen, Berlin Heidelberg NewYork: Springer Verlag, 2006.
- [21] H. G. Hahn, *Bruchmechanik*, Stuttgart: Teubner Verlag, 2006.
- [22] NN, *Grundlagen der Werkstoffe*, TU Cottbus: Lehrstuhl Metallkunde und Werkstofftechnik, 2014.
- [23] C.H. Wells, C.P. Sullivan, *Trans ASM*, Bd. Vol. 62, 1969.
- [24] D. K. Benson, J. C. Grosskreutz, G.G. Shaw, *Met. Trans*, 1972.
- [25] D. Radaï, *Ermüdungsfestigkeit*, Berlin Heidelberg new York: Springer Verlag, 2003.
- [26] H. Blumenauer, G. Pusch, *Technische Bruchmechanik*, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.
- [27] H. Blumenauer, *Werkstoffprüfung*, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1994.
- [28] J. Rösler, H. Harders, M. Bäker, *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, Wiebaden: Teubner Verlag, 2006.
- [29] D. Munz, K. Schwalbe, P. Mayr, *Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe*, Bd. Band 3 E. Macherauch und V. Gerold Hrsg., Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn GmbH, 2001.
- [30] M. Glavatskikh, *Verbesserung des Ermüdungsverhaltesn von gamma-TiAl-Legierungen durch mechanische Oberflächenbehandlung*.
- [31] DIN 53442, *Flexural fatigue testing of plastics using flat specimens*, Beuth, 1990.
- [32] M. Sander, *Sicherheit und betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen*, 2008:

Springer.

- [33] F. Larson, A. Zarkades, „MCIC Report 74-20,“ Batelle Columbus Labs, 1974.
- [34] F. Larson, A. Zakarides, D. H. Avery, „Titanium Science Technology, Vol 2, S. 1169,“ 1973.
- [35] A.W. Sommer, M. Creager, „Report TR-76-222,“ AFML, 1977.
- [36] M.J. Blackburn, J.A. Feeney, T.R. Beck, „Advanced Corrosion Science Technology, Vol. 3, S. 67,“ 1973.
- [37] G. Lütjering, L. Wagner, „Directional Properties of Materials, S.177,“ DGM, H.J. Brunge, 1988.
- [38] R.K. Steele, A.J. McEvily, „Eng. Fract. Mech., Vol. 8, S. 31,“ 1976.
- [39] W. Beitz, K.-H. Grote, Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Berlin: Springer, 2001.
- [40] S. Adachi, L. Wagner, G. Lütjering, „Fatigue Eng. Mat. Struct.; S. 67,“ ImechE, 1986.
- [41] E. Maawad, S. Yi, H.G. Brokmeier, M. Wollman, L. Wagner, in *Residual stress induced subsurface fatigue crack nucleation in shot peened titanium alloys*, Tokio, 2008.
- [42] L. Wagner, T. Dörr, *Mechanische Oberflächenbehandlungen von Titanlegierungen: Grundsätzliche Mechanismen*, Bd. Heft 5.2 S. 138, Cottbus, 1997.
- [43] H. Gray, L. Wagner, G. Lütjering, *Effect of Modified Surface Microstructures through Shot Peening and Subsequent Heat Treatment on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Ti-Alloys*, ICSP3, p.467-476, 1987.
- [44] T. Dörr, L. Wagner, *Surface Performance of titanium alloys*, J.K. Gregory, H.J. Rack, D. Eylon, 1996.
- [45] T. Dörr, L. Wagner, Bd. S. 281, C.A. Brebbia, J.M. Kenny, 1999.
- [46] T. Hirsch, *Zum Einfluss des Kugelstrahlens auf die Biegeschwingfestigkeit von Titan- und Aluminiumbasislegierungen*, Univ. Karlsruhe, 1983.
- [47] Maawad, Yi, Brokmeier, Wollmann, Wagner, *Residual Stress-induced Subsurface Fatigue Crack Nucleation In Shot Peened Titanium Alloys*, Japan: ICSP10, 2008.

-
- [48] Wagner, L., „Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys,“ Elsevier Science, 1999.
- [49] J.K. Gregory, L. Wagner, C. Müller, „Surface Engineering, S. 435,“ DGM, P. Mayr, 1993.
- [50] J.K. Gregory, L. Wagner, „Fatigue 1993, S. 177,“ J.-O. Bailon, J.I. Dickson, EMAS, 1993.
- [51] A. Berg, J. Kiese, L. Wagner, *Material Science Engineering*, S. 146, 1998.
- [52] Calles, *Der Werkstoff Titan - Wärmebehandlungsmöglichkeiten*, HTW, Saarland.
- [53] Wagner, L., Lutjering, G., in *Influence Of Shot Peening On The Fatigue Behaviour Of Titanium Alloys*, ICSP1, Paris, France, 1981.
- [54] Wagner, L. and Lutjering, G., Bd. ICSP2, Chicago, USA: ICSP2, 1984.
- [55] Wagner, L. and Lutjering, G., „Influence Of The Shot Peening Parameters On The Surface Layer Properties And Fat. Life Of Ti-6Al-4V,“ ICSP2, 1984.
- [56] W. L. Gray, „Effect of Modified Surface Microstructures through Shot Peening and Subsequent Heat Treatment on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Ti Alloys,“ 1987.
- [57] K. Masaki, N. Hisamori, Y. Kobayashi, D. Gowa, in *Effects of Zirconia Shot Peening on High Cycle Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy*, ICSP12, Goslar, Germany, 2014.
- [58] Mhaede, Sano, Altenberger, Wagner, in *Fatigue Performance of Al7075-T73 and Ti-6Al-4V: Comparing Results after Shot Peening, Laser Shock Peening and Ball-Burnishin*, ICSP11, South Bend, USA, 2011.
- [59] H. Wohlfahrt, *Eigenspannungen*, Bde. 1 von 2 Bd. 2, 301, E. Macherauch und V. Hauk, 1983.
- [60] B. Scholtes, O. Vöhringer, „Ursachen, Ermittlung und Bewertung von Randschichtveränderungen durch Kugelstrahlen,“ *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 1993.
- [61] B. Scholtes, O. Vöhringer, *Grundlagen der mechanischen Oberflächenbehandlung*, DGM Informationsgesellschaft.
- [62] O. Vöhringer, „Changes In The State Of The Material By Shot Peening,“ ICSP3,

1987.

- [63] B. Scholtes, O. Vöhringer, „Grundlagen der mechanischen Oberflächenbehandlung,“ in *Mechanische Oberflächenbehandlung*, Oberursel, DGM Informationsgesellschaft, 1989.
- [64] K. Shen, *Einfluss des Strahlwinkels beim Kugelstrahlen auf das Dauerschwingverhalten von Ti-6Al-4V*, TU Clausthal, 2016.
- [65] Metal Improvement Company, *Kugelstrahlanwendungen*, Neunte Auflage.
- [66] E. K. S. Maawad, *Residual Stress Analysis and Fatigue Behavior of Mechanically Surface Treated Titanium Alloys*, TU Clausthal: HZG Report 2013-1, 2013.
- [67] SAE Aerospace, *AMS2431 - Peening Media*.
- [68] SAE International, *J2277 - Shot Peening Coverage Determination*, 2009.
- [69] SAE International, *SAE J443 - Procedures for Using Standard Shot Peening Almen Strip*, 2010.
- [70] J. Köcher, *Einfluß von Kugelstrahlen auf die Zahnflankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zylinderräder*, Bd. Forschungsheft Nr. 449, Frankfurt: Forschungsvereinigung Antriebstechnik, 1995.
- [71] Ferrari, V.A., Woelfel, M.M., in *The Relationship Between Peening Intensity And Metal Erosion Rate With Respect To Nozzle Angle*, ICSP2, Chicago, USA, 1984.
- [72] H. Diep, H. Bae, M. Ramulu, South Bend: ICSP11, 2011.
- [73] Balcar, G.P. and Maltby, F.C., ICSP1, 1981.
- [74] Simpson, R.S. and Probst, R.L., in *Topography And Fracture Studies Of Surfaces Shot Peened At Different Intensities*, ICSP3, Garmisch Partenkirchen, Germany, 1987.
- [75] Simpson, R.S., Chiasson, G.L., in *Quantification Of Effects Of Various Levels Of Severe Critical Shot Peen Process Variables On Workpiece Surface integrity*, Wright-Patterson AFB, AFWAL-TR-88-3029, Phase II, 1988.
- [76] Tosha, K. and Iida, K., in *Stock Removal And Surface Residual Stress Of Grit Blasted Titanium*, ICSP-4, Tokyo, Japan, 1990.
- [77] M. K. Tufft, *Dissertation: Development of a Fracture Mechanics / Threshold Behavior Model*, University of Dayton, Dayton, Ohio, 1997.

-
- [78] R. Fathallah, G. Inglebert, L. Castex, *Prediction of Plastic Deformation and Residual Stresses Notice Induced in Metallic Parts By Shot Peening*, The Institute of Materials, 1998.
- [79] D. Kirk, *Effects of Varying Shot Impact Angle*, Coventry University: ShotPeener, 2005.
- [80] V. Schulze, S. Dietrich, *DGM Vortrag: Mechanische Oberflächenbehandlungen von Leichtmetallen - Randschichten - Auswirkungen - Modifikationen*, KIT Karlsruhe.
- [81] SAE International, *AMS4928 - Titanium Alloy Bars, Wire, Forgings, and Rings 6Al - 4V Annealed*, 2016.
- [82] ASTM International, *ASTM B 348*, 2013.
- [83] S. Jung und W. Haas, „Oberflächenbeurteilung - Rauheitsmessung“, IMA Univ. Stuttgart.
- [84] Stresstech, „Stresstech Germany“, [Online]. Available: www.stresstechgroup.com. [Zugriff am 28 07 2016].
- [85] SNECMA Moteurs, *Verfestigen von Oberflächen*, 2007.
- [86] DIN 50113:1982-03, *Prüfung metallischer Werkstoffe; Umlaufbiegeversuch*, 1982.
- [87] SAE International, *J442 - Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening*.